

Imię i nazwisko autora rozprawy: **Sławomir Sommer**

Dyscyplina naukowa: **Inżynieria Mechaniczna**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: **Opracowanie deskryptora nawierzchni drogowej do oceny oporu toczenia opon samochodowych**

Tytuł rozprawy w języku angielskim: **Development of a road texture descriptor for the evaluation of the rolling resistance of car tires**

Promotor <i>podpis</i>	Drugi promotor <i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Jerzy Ejsmont	
Promotor pomocniczy <i>podpis</i>	Kopromotor <i>podpis</i>
dr hab. inż. Beata Świczko-Żurek, prof. uczelni	

OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: **Sławomir Sommer**

Ja, niżej podpisany(a), oświadczam, iż jestem świadomy(a), że zgodnie z przepisem art. 27 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2021 poz. 1062), uczelnia może korzystać z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Opracowanie deskryptora nawierzchni drogowej do oceny oporu toczenia opon samochodowych

do prowadzenia badań naukowych lub w celach dydaktycznych.¹

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2021.478 t.j.), a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem **prof. dr hab. inż. Jerzym Ejsmontem**, ~~drugim promotorem~~ <drugi promotor>, promotorem pomocniczym **dr hab. inż. Beatą Świeczko- Żurek**, ~~kopromotorem~~ <kopromotor>*.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami, zgodnie z przepisem art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

*) niepotrzebne skreślić

¹ Art. 27. 1. Instytucje oświatowe oraz podmioty, o których mowa w art. 7 ust. 1 pkt 1, 2 i 4–8 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mogą na potrzeby zilustrowania treści przekazywanych w celach dydaktycznych lub w celu prowadzenia działalności naukowej korzystać z rozpowszechnionych utworów w oryginale i w tłumaczeniu oraz zwielokrotniać w tym celu rozpowszechnione drobne utwory lub fragmenty większych utworów.

2. W przypadku publicznego udostępniania utworów w taki sposób, aby każdy mógł mieć do nich dostęp w miejscu i czasie przez siebie wybranym korzystanie, o którym mowa w ust. 1, jest dozwolone wyłącznie dla ograniczonego kręgu osób uczących się, nauczających lub prowadzących badania naukowe, zidentyfikowanych przez podmioty wymienione w ust. 1.

OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Sławomir Sommer

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Opracowanie deskryptora nawierzchni drogowej do oceny oporu toczenia opon samochodowych

Tytuł rozprawy w języku angielskim: Development of a road texture descriptor for the evaluation of the rolling resistance of car tires

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Jerzy Ejsmont

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej*: dr hab. inż. Beata Świeczko- Żurek, prof. uczelni

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polskim: opona, opór toczenia, nawierzchnia drogowa, tekstura nawierzchni, enveloping

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: tire, rolling resistance, road pavement, road texture, enveloping

Streszczenie rozprawy w języku polskim: Na początku niniejszej pracy pt. „Opracowanie deskryptora nawierzchni drogowej do oceny oporu toczenia opon samochodowych” przedstawiono zagadnienia dotyczące oporów ruchu pojazdu. Omówiono metody zarówno drogowe, jak i laboratoryjne badań oporu toczenia opon samochodowych. Zaprezentowano przykładowe wartości współczynników oporu toczenia opon na różnych rodzajach nawierzchni. Kolejno omówiono metody pomiaru tekstury nawierzchni. W dalszej części przedstawiono obowiązującą procedurę określania średniej głębokości profilu (Mean Profile Depth- MPD) wykonywaną zgodnie z normą ISO 13473-1. Przedstawiono wpływ tekstury nawierzchni na opór toczenia opon samochodowych. W pracy doktorskiej wykazano, że parametr MPD źle koreluje się ze współczynnikiem oporu toczenia opon. W celu przeprowadzenia analiz tekstur nawierzchni opracowano autorskie stanowiska badawcze: do pomiaru profilu tekstur nawierzchni oraz wykonanych na nich odcisków opon, a także do pomiaru sztywności dynamicznej bieżnika opony w warunkach penetracji przez elementy tekstury nawierzchni. Przeanalizowano szereg parametrów geometrycznych związanych z teksturą nawierzchni w aspekcie oporu toczenia. W efekcie opracowano parametr Descriptor of Pavement Texture (DPT50), który lepiej niż MPD koreluje się z oporem toczenia. W dalszej części przedstawiono model matematyczny opisujący ten parametr. W wyniku przeprowadzonych analiz opracowano wzorcową nawierzchnię, która ma posłużyć do prowadzenia normatywnych badań opon w warunkach laboratoryjnych. Na zakończenie pracy przedstawiono autorską technologię wytwarzania replik nawierzchni rzeczywistych, jak i wzorcowych przeznaczonych do pokrywania stalowych bębnow maszyn bieżnych.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim: At the beginning of this work, "Development of a road texture descriptor for the evaluation of the rolling resistance of car tires " issues related to the resistance to motion of the vehicle were presented. Road and laboratory methods of testing the rolling resistance of car tires are discussed. Examples of the values of the coefficients of the rolling resistance of tires on various types of surfaces are presented. The methods of measuring the texture of the pavement are discussed successively. The following section presents the binding procedure for determining the mean profile depth (MPD) according to the ISO 13473-1 standard. The influence of the surface texture on the rolling resistance of car tires was presented. The dissertation showed that the MPD parameter correlates poorly with the coefficient of rolling resistance of tires. In order to analyze the pavement textures, proprietary test stands were developed: to measure the pavement texture profile and the tire impressions made on them, as well as to measure the dynamic stiffness of the tire tread in the conditions of penetration by the pavement texture elements. A number of geometric parameters related to the pavement texture in terms of rolling resistance were analyzed. As a result, the DPT50 parameter was developed, which correlates better than MPD with rolling resistance. The mathematical model describing this parameter is presented in the following. As a result of the conducted analyzes, a model pavement was developed to be used for standard tire tests in laboratory conditions. At the end of the work, the proprietary technology of manufacturing replicas of real and model surfaces for covering steel drums of running machines was presented.



Serdecznie dziękuję:

prof. dr hab. inż. Jerzemu Ejsmontowi

za pomoc oraz za cenne wskazówki;

dr hab. inż. Grzegorzowi Ronowskiemu

za pomoc oraz za cenne wskazówki;

dr inż. Wojciechowi Owczarzakowi

za pomoc;

Żonie Agacie

za wsparcie, cenne wskazówki i motywację;

Rodzicom

za pomoc i wsparcie;

Wszystkim Kolegom i Koleżankom z WiMiO

za wsparcie.

Spis treści

1.	WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	7
2.	WSTĘP	8
3.	CEL PRACY I UZASADNIENIE TEMATYKI BADAWCZEJ.....	9
4.	ZAKRES PRACY	10
5.	OPORY RUCHU.....	11
5.1.	OPÓR BEZWŁADNOŚCI	11
5.2.	OPÓR POWIETRZA.....	11
5.3.	OPÓR WZNIESIENIA	12
5.4.	OPÓR SKRĘTU	13
5.5.	OPÓR UCIĄGU.....	13
5.6.	OPÓR TOCZENIA	13
6.	METODY POMIARU OPORU TOCZENIA	18
6.1.	WPROWADZENIE	18
6.2.	LABORATORYJNE METODY POMIARU OPORU TOCZENIA.....	18
6.2.1.	<i>Metoda pomiaru sił w osi koła.....</i>	<i>18</i>
6.2.2.	<i>Metoda pomiaru momentu.....</i>	<i>19</i>
6.2.3.	<i>Metoda wybiegu.....</i>	<i>19</i>
6.2.4.	<i>Metoda pomiaru mocy elektrycznej.....</i>	<i>19</i>
6.3.	DROGOWE METODY POMIARU OPORU TOCZENIA	19
6.3.1.	<i>Metody badania oporu toczenia za pomocą pojazdu badawczego.....</i>	<i>20</i>
6.3.2.	<i>Metody pomiaru oporu toczenia za pomocą przyczep dynamometrycznych</i>	<i>20</i>
6.4.	METODY POMIARU OPORU TOCZENIA WYKORZYSTYWANE W ZAKŁADZIE POJAZDÓW MECHANICZNYCH I TECHNIK MILITARNYCH NA WYDZIALE INŻYNIERII MECHANICZNEJ I OKRĘTOWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ	21
7.	WPŁYW TEKSTURY NAWIERZCHNI NA OPÓR TOCZENIA OPON SAMOCHODOWYCH.....	27
8.	PROCEDURA OKREŚLANIA ŚREDNIEJ GŁĘBOKOŚCI PROFILU (MPD).....	30
9.	MIĘDZYNARODOWY WSKAŹNIK RÓWNOŚCI	30
10.	BADANIE TEKSTURY NAWIERZCHNI	31
10.1.	METODA OBJĘTOŚCIOWA	31
10.2.	METODA WYPŁYWU CIECZY.....	32
10.3.	METODA POMIARU PROFILOMETREM LASEROWYM.....	32
10.4.	METODA FOTOGRAFII STEREOGRAFICZNEJ.....	34
10.5.	METODA ODCISKOWA	34
11.	OTULENIE NAWIERZCHNI PRZEZ ELEMENTY BIEŻNIKA UGIĘTEJ OPONY	35
12.	STANOWISKO DO POMIARU SZTYWNOŚCI DYNAMICZNEJ W WARUNKACH PENETRACJI BIEŻNIKA PRZEZ ELEMENTY TEKSTURY NAWIERZCHNI	37
12.1.	BUDOWA STANOWISKA.....	37
12.2.	METODYKA BADAWCZA	39
12.3.	PENETRATORY DO BADANIA SZTYWNOŚCI DYNAMICZNEJ BIEŻNIKA OPONY	40
12.4.	POMIARY SZTYWNOŚCI DYNAMICZNEJ OPONY Z ZASTOSOWANIEM PENETRATORÓW O RÓŻNEJ GEOMETRII	41
12.5.	WPŁYW CIŚNIENIA NA SZYBKOŚĆ PENETRACJI I ZAGŁĘBIENIE PENETRATORA W OPONĘ NA PRZYKŁADZIE WYPUKŁEJ SFERY O ŚREDNICY 8 MM.....	42



12.6.	WPLYW CIŚNIENIA POMPOWANIA OPONY NA SZYBKOŚĆ PENETRACJI I ZAGŁĘBIENIE W OPONĘ NA PRZYKŁADZIE PENETRATORA Z WYPUKŁĄ SFERĄ O ŚREDNICY 8 MM.....	45
12.7.	WPLYW ZANIECZYSZCZENIA WPROWADZONEGO POMIĘDZY OPONĘ A PENETRATOR NA SZYBKOŚĆ I WIELKOŚĆ ZAGŁĘBIENIA W OPONĘ	47
12.8.	ANALIZA ZAGŁĘBIENIA PENETRATORA W OPONĘ W FUNKCJI SIŁY WYMUSZAJĄCEJ.....	49
12.9.	ANALIZA WPŁYWU TWARDOŚCI MIESZANKI GUMOWEJ BIEŻNIKA NA ZAGŁĘBIENIE PENETRATORA W OPONĘ	54
12.10.	POSZUKIWANIE DESKRYPTORA NAWIERZCHNI W OPARCIU O GŁĘBOKOŚĆ PENETRACJI BIEŻNIKA OPONY	54
13.	STANOWISKO DO BADANIA TEKSTURY NAWIERZCHNI	59
13.1.	BUDOWA STANOWISKA.....	59
13.2.	METODYKA BADAWCZA	60
13.3.	OPRACOWANE PRÓBKI DO BADANIA TEKSTURY NAWIERZCHNI	61
13.4.	ODCISKI OPONY NA NAWIERZCHNI BADAWCZEJ	62
14.	MATEMATYCZNA ANALIZA ELEMENTÓW TEKSTURY NAWIERZCHNI WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z OPONĄ	65
15.	PROPOZYCJA METODY OCENY TEKSTURY NAWIERZCHNI DO WYZNACZANIA OPORÓW TOCZENIA ..	72
16.	WZORCOWA NAWIERZCHNIA DO BADAŃ NORMALIZACYJNYCH.....	80
17.	WNIOSKI	86
18.	DALSZE PLANY BADAWCZE:	87
19.	SPIS RYSUNKÓW:.....	88
20.	LITERATURA:.....	93
ZAŁĄCZNIK 1 TECHNOLOGIA WYTWARZANIA NAWIERZCHNI DO POKRYWANIA BĘBNÓW STALOWYCH.....		99
	WYKONANIE ODLEWU RZECZYWISTEJ LUB WZORCOWEJ NAWIERZCHNI	99
	PRZYGOTOWANIE SZKIELETU FORMY ZEWNĘTRZNEJ I WEWNĘTRZNEJ DO ODLEWANIA SEGMENTU NAWIERZCHNI.....	100
	POKRYCIE FORMY ZEWNĘTRZNEJ ŻELKOTEM WYMIESZANYM Z KRUSZYWEM.....	101
	NAŁOŻENIE MATY SZKLANEJ I NASĄCZENIE JEJ ŻYWICĄ EPOKSYDOWĄ.....	102
	POKRYCIE FOLIĄ WEWNĘTRZNEJ FORMY	103
	NAŁOŻENIE MATY SZKLANEJ I NASĄCZENIE ŻYWICĄ	103
	POŁĄCZENIE FORMY WEWNĘTRZNEJ I ZEWNĘTRZNEJ PO UPRZEDNIM USZCZELNIENIU.....	104
	WYPEŁNIENIE FORMY ŻYWICĄ ODLEWNICZĄ.....	104
	ROZFORMOWANIE SEGMENTU REPLIKI PO UTWARDZENIU ŻYWICY	105
	OBROBKA MECHANICZNA SEGMENTÓW	105
	MONTAŻ NA BĘBNIE	107
ZAŁĄCZNIK 2 CHARAKTERYSTYKA NAWIERZCHNI UŻYWANYCH DO BADAŃ.		108
ZAŁĄCZNIK 3 DOROBEK NAUKOWY		118
	PUBLIKACJE	118
	UDZIAŁ W PROJEKTACH	119

1. WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

a- przyspieszenie liniowe pojazdu [m/s^2]

A- powierzchnia czołowa pojazdu [m^2]

AAV4- opona ENGLAND AVON AAV4 SUPERVAN AV4 195R14C

APS4- szorstka nawierzchnia drogowa wykorzystywana do badań oporu toczenia na stanowisku bębnowym

CEL- współczynnik metody oscylacyjnej (Coefficient of Energy Losses) [-]

CRR- współczynnik oporu toczenia (Coefficient of Rolling Resistance) [-]

Cx- współczynnik kształtu [-]

DAC16- beton asfaltowy o maksymalnym uziarnieniu 16 mm

DPT₅₀- zagłębienie nawierzchni w oponę przy objętości zagłębionych elementów wynoszącej 50 mm^3 (Descriptor of Pavament Texture [$\text{mm}/50\text{mm}^3$])

Fb- siła oporu bezwładności [N]

Fbx- siła oporu skrętu [N]

Fp- siła oporu powietrza [N]

Fw- siła oporu wzniesienia [N]

G- ciężar pojazdu [N]

m- masa pojazdu [kg]

MPD- średnia głębokość profilu nawierzchni [mm]

PERS- nawierzchnia poroelastyczna

rz- promień zakrętu [m]

SMA8- nawierzchnia z mieszanki mineralno – asfaltowej o dużej zawartości grysów

SRTT- opona USA UNIROYAL TIGER PAW M+S P225/60R16

SW80- nawierzchnia bardzo gładka (Safety Walk)

v- prędkość pojazdu [m/s]

W_t- siła oporu toczenia [N]

α - kąt pochylenia wzdłużnego drogi [°]

β - kąt pomiędzy osią podłużną pojazdu i styczną do toru ruchu pojazdu [°]

δ - współczynnik mas wirujących [-]

ρ - gęstość powietrza [g/dm^3]

2. WSTĘP

Pojazdy wykorzystywane są w wielu dziedzinach życia, a w szczególności jako środki transportu indywidualnego. W 2015 roku liczba samochodów na świecie wynosiła 1,1 mld. Oznacza to, że jeden samochód osobowy przypadał na 6,5 mieszkańca. Liczba samochodów jednak stale rośnie. Szacuje się, że w 2025 roku ich liczba wyniesie 1,5 mld, natomiast 15 lat później już 2 mld. W 2015 roku w Polsce na 1000 mieszkańców przypadało 599 pojazdów [67]. Z powodu tak dużej liczebności pojazdów oraz zmniejszania się zasobów surowców energetycznych należy poczynić kroki w kierunku zmniejszenia zużycia energii w transporcie drogowym. Nawet minimalne zmniejszenie zużycia paliwa pozwala uzyskać wymierne korzyści ekonomiczne oraz ekologiczne. Z tych powodów w instytutach badawczych nieustannie pracuje się nad zmniejszeniem zużycia energii (paliwa). Jedną z metod ograniczenia zużycia paliwa jest zmniejszenie oporów toczenia, które są istotne szczególnie przy małych i średnich prędkościach pojazdu. Opór toczenia pojazdów jest jednym z podstawowych oporów ruchu. Co więcej, energii straconej na pokonanie oporu toczenia opon nie można odzyskać, w przeciwieństwie na przykład do energii zużytej na rozpędzanie pojazdu. W pojeździe poruszającym się w cyklu miejskim opór toczenia stanowi około 47% całkowitych oporów ruchu. Podczas jazdy ze stałą prędkością 90 km/h opór toczenia stanowi blisko 38% oporów ruchu. Zwiększenie prędkości do 120 km/h powoduje zmniejszenie udziału oporu toczenia w oporach ruchu do 25% przy czym w wartościach bezwzględnych siła oporu toczenia pozostaje zbliżona do siły występującej przy niższych prędkościach [17, 18]. Według danych dostępnych w literaturze dla średniej wielkości samochodu osobowego zmniejszenie oporu toczenia o 10% powoduje spadek zużycia paliwa o około 3% [7, 18, 19, 22]. Wartość oporu toczenia samochodu zależy od nawierzchni drogowej, właściwości konstrukcyjnych opon, warunków ruchu, a także cech konstrukcyjnych samochodu.

Opór toczenia zależy od właściwości i stanu nawierzchni drogowej, po której porusza się pojazd. Z tego powodu istotne jest znalezienie zależności pomiędzy oporem toczenia a parametrami nawierzchni drogowej. Stosowane obecnie metody charakteryzujące parametry geometryczne nawierzchni drogowych, czyli teksturę, bazują na dwuwymiarowym zapisie profilu pionowego nawierzchni i analizie matematycznej tego profilu. Niestety, stosowane algorytmy pomijają zagadnienie współpracy stosunkowo sztywnej nawierzchni z silnie odkształcalną strukturą opony. Analizie poddawany jest cały zakres profilu: od szczytów nierówności do dna zagłębień między nimi. W rzeczywistości jednak opona styka się zazwyczaj jedynie z górnymi partiami nierówności, nie wchodząc w kontakt z zagłębieniami. Oznacza to, że przynajmniej z punktu widzenia oporu toczenia związanego z odkształceniami bieżnika opony, ta część profilu nawierzchni, która nie styka się z oponą, nie ma wpływu na straty energetyczne. Zjawisko odkształcania się elementów bieżnika w rejonie styku z nawierzchnią nazywane jest otulaniem (z ang. *enveloping*).

W pracy podjęto próbę opracowania algorytmu charakteryzującego teksturę z uwzględnieniem otulania. Otulanie jest zjawiskiem skomplikowanym i jeszcze niewystarczająco poznany. Podczas kontaktu z elementami nawierzchni drogowej bieżnik opony penetruje wgłębienia nawierzchni próbując odwzorować jej kształt, ale proces ten jest silnie zależny od tekstury nawierzchni drogowej oraz od prędkości, gdyż odkształcenia gumy bieżnika uzależnione są od prędkości narastania nacisku. Zaplanowane badania miały na celu wyjaśnienie zjawiska zachodzącego podczas otulania nawierzchni przez elementy bieżnika opony oraz sprawdzenie wpływu otulania na opór toczenia opon samochodowych.

3. CEL PRACY I UZASADNIENIE TEMATYKI BADAWCZEJ

Wiele ośrodków naukowych prowadzi pomiary oporu toczenia opon samochodowych z wykorzystaniem metod laboratoryjnych. Naukowcy próbują powiązać teksturę nawierzchni opisywaną parametrem MPD ze współczynnikiem oporu toczenia. Efektem tych poszukiwań jest uzyskanie mało dokładnej korelacji liniowej pomiędzy parametrem MPD a współczynnikiem oporu toczenia. Powodem tego jest to, że parametr MPD opisuje całą wysokość nierówności tekstury nawierzchni. Natomiast za opór toczenia opony odpowiedzialna jest ta część nierówności tekstury, która ma bezpośredni kontakt z oponą. Dlatego też szczególnie przy agresywnych nawierzchniach o dużym parametrze MPD, ten parametr nie może prawidłowo korelować się ze współczynnikiem oporu toczenia opony. W związku z tym głównym celem pracy jest znalezienie parametru, który będzie opisywał tę część nierówności nawierzchni, która wchodzi w bezpośredni kontakt z oponą. Problem z określeniem korelacji pomiędzy oporem toczenia a teksturą nawierzchni jest tym większy, że tylko nieliczne jednostki badawcze są w stanie prowadzić badania oporu toczenia na nawierzchniach innych niż gładka nawierzchnia stalowa. Politechnika Gdańska jest w tym zakresie niemal monopolistą.

Aby móc zrealizować powyższy cel postawiono następującą tezę:

Możliwe jest opracowanie wskaźnika liczbowego (deskryptora) opisującego wpływ tekstury nawierzchni na opór toczenia opon, lepiej niż jest to teraz możliwe z wykorzystaniem parametru MPD.

Kolejnym celem pracy doktorskiej było opracowanie oraz wykonanie nawierzchni wzorcowej przeznaczonej do pokrywania bębnow stalowych maszyn bieżnych. Wyniki badań oporu toczenia i hałasu opon uzyskiwane na tej nawierzchni powinny być porównywalne z rezultatami badań przeprowadzonymi na typowej nawierzchni drogowej SMA8. Tekstura takiej nawierzchni będzie składała się z powtarzalnych elementów geometrycznych. Ułatwi to jej wykonywanie oraz zapewni dużą powtarzalność. W przyszłości autor podejmie działania zmierzające do wprowadzenia opracowanej nawierzchni jako nawierzchni normatywnej.

Aby móc zrealizować kolejny cel postawiono następującą tezę:

Możliwe jest opracowanie nawierzchni wzorcowej przeznaczonej do pokrywania bębnow maszyn bieżnych, której własności pod względem oporu toczenia i hałasu będą zbliżone do rzeczywistej nawierzchni drogowej, a sama nawierzchnia będzie stosunkowo łatwa do odtworzenia przez różne ośrodki badawcze (nie będzie wymagać posiadania fizycznego wzorca).

4. ZAKRES PRACY

Realizacja zamierzenia badawczego wymagała następujących kroków:

- Opracowania cyfrowych modeli tekstury nawierzchni umożliwiających analizę współpracy opony z nawierzchnią.
- Zidentyfikowania elementów tekstury nawierzchni, które kontaktują się z oponą. Te elementy są bezpośrednio odpowiedzialne za wielkość siły oporu toczenia opony po nawierzchni.
- Opracowania metodyki opisu liczbowego odpowiadającego rzeczywistej powierzchni współpracy opony z nawierzchnią. Opis ten umożliwi poszukiwanie parametru, który lepiej niż parametr MPD będzie korelował ze współczynnikiem oporu toczenia nawierzchni.
- Przeanalizowania lokalnych odkształceń opony w aspekcie tekstury nawierzchni. Wielkość takich odkształceń bezpośrednio wiąże się ze stratami energetycznymi w masywie gumy.
- Powiązania siły wymuszającej z głębokością wnikania w oponę elementarnej nierówności nawierzchni. Siła oraz głębokość wnikania w oponę jest ściśle związana z kształtem pojedynczej nierówności.
- Opracowania korelacji parametru liczbowego opisującego geometryczną interakcję opony z nawierzchnią ze współczynnikiem oporu toczenia.
- Stworzenia technologii wykonywania segmentowej nawierzchni przeznaczonej do pokrywania stalowych bębnow maszyn bieżnych.
- Opracowania nawierzchni wzorcowej, której własności związane z hałasem i oporem toczenia opon będą zbliżone do rzeczywistej nawierzchni SMA8. Tekstura tej nawierzchni powinna być powtarzalna i łatwa do wykonania.

5. OPORY RUCHU

Oporami ruchu określa się siły zewnętrzne o kierunku zgodnym z kierunkiem poruszania się pojazdu, ale przeciwnym zwrocie. Zalicza się do nich opór [1, 2, 50]:

- a) bezwładności,
- b) powietrza,
- c) wzniesienia,
- d) skrętu
- e) uciągu,
- f) toczenia.

5.1. Opór bezwładności

Opór bezwładności (F_b) występuje podczas zmiany prędkości ruchu samochodu. Oblicza się go wg wzoru (1) [1]:

$$F_b = \delta \cdot a \cdot m \quad (1)$$

gdzie: m - masa pojazdu, a - przyspieszenie liniowe samochodu, δ - współczynnik mas wirujących.

5.2. Opór powietrza

Pojazd będący w ruchu napotyka opór powietrza wywołany siłami aerodynamicznymi. Przy prędkościach poniżej 30 km/h opór ten jest pomijany, ponieważ jego wartość jest znacznie niższa od pozostałych oporów ruchu [1, 2, 5].

Siłę aerodynamiczną tworzą poniższe składowe [1]:

- a) poprzeczna, równoległa do płaszczyzny jezdni- napór boczny,
- b) prostopadła do płaszczyzny jezdni- siła nośna,
- c) wzdłużna, równoległa do osi symetrii pojazdu, o zwrocie przeciwnym do kierunku ruchu- opór powietrza.

W warunkach bezwietrznych opór powietrza (F_p) jest określany dla pojazdu poruszającego się wg zależności (2) [1]:

$$F_p = C_x \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot A \quad (2)$$

gdzie: C_x - współczynnik kształtu, ρ - gęstość powietrza, A - powierzchnia czołowa pojazdu.

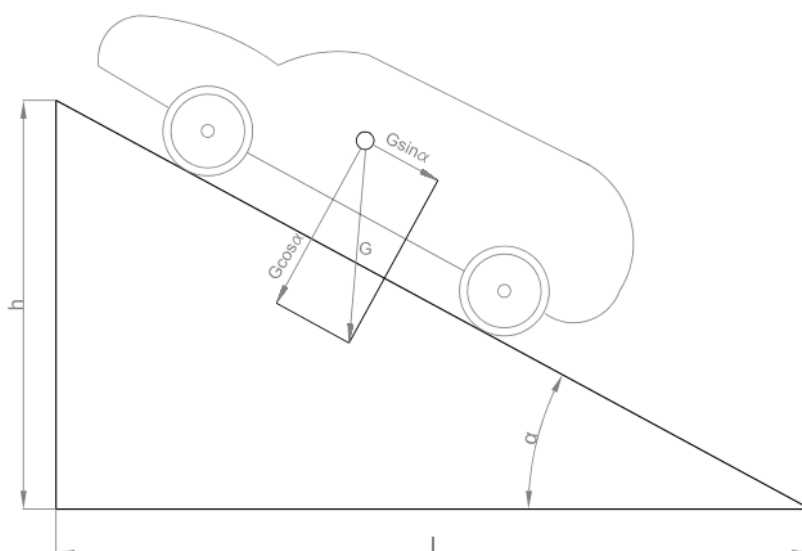
Współczynnik kształtu jest wyznaczany na podstawie badań prowadzonych w tunelu aerodynamicznym. Jako gęstość powietrza przyjmuje się wartość gęstości dla warunków normalnych, tj. temperatury 273,15 K i ciśnienia 1013,25 hPa. Jej wartość wynosi wówczas $\rho = 1,293 \text{ g/dm}^3$.

Powierzchnia czołowa jest powierzchnią rzutu obrysu samochodu na pionową płaszczyznę, która jest prostopadła do osi wzdłużnej symetrii pojazdu. Jej wartość w sposób precyzyjny można określić na podstawie rysunków konstrukcyjnych.

5.3. Opór wzniesienia

Opór wzniesienia (F_w) (Rys. 1, wzór 3) stanowi równoległa do nawierzchni wzdłużna składowa siły ciężkości (G). Zwrot składowej siły ciężkości jest przeciwny do zwrotu kierunku ruchu pojazdu [1, 50].

$$F_w = G \cdot \sin\alpha \quad (3)$$



Rys. 1 Opór wzniesienia dla drogi nachylonej pod kątem α .

Podczas zjeżdżania pojazdu z pochyłości składowa siły ciężkości przyjmuje zwrot zgodny ze zwrotem kierunku ruchu i przyjmuje ujemną wartość. Spadek lub wzniesienie drogi można obliczyć za pomocą wzoru (4) [2]:

$$100 \cdot \operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{l} = w \quad (4)$$

gdzie: h/l - stosunek długości przyprostokątnych trójkąta (Rys.1.)

Stosunek h/l jest wykorzystywany w drogownictwie do określania stromości spadków oraz wzniesień; przykładowo, dla kąta α równego 17° stosunek h/l wynosi 0,3. Największe wzniesienia dróg przeważnie nie przekraczają wartości h/l równej 0,26.

5.4. Opór skrętu

Na pojazd poruszający się po torze krzywoliniowym o promieniu (r_z) ze stałą prędkością (v) w środku jego masy działa siła odśrodkowa ($\frac{mv^2}{r_z}$). Siłę tę równoważą reakcje nawierzchni działające na koła o składowej poprzecznej i wzdłużnej do podłużnej osi symetrii pojazdu. Wzdłużna składowa, czyli opór skrętu (F_{bx}) wyrażona jest poniższym wzorem (5) [2]:

$$F_{bx} = \frac{m \cdot v^2}{r_z} \sin \beta \quad (5)$$

gdzie: β jest kątem pomiędzy osią podłużną pojazdu i styczną do toru ruchu pojazdu.

5.5. Opór uciągu

Dla pojazdów ciągnących przyczepę uwzględnia się opór uciągu. Stanowi on sumę oporów powietrza, toczenia, wzniesienia oraz bezwładności przyczepy, która jest holowana. Opory te definiuje się w sposób analogiczny jak dla samochodu. Współczynnik kształtu ciągniętej przyczepy zależy od jej konstrukcji [1, 2].

5.6. Opór toczenia

Opór toczenia samochodowego koła ogumionego jest jednym z najbardziej istotnych parametrów charakteryzujących współpracę opon samochodowych z nawierzchnią jezdni. Wartość oporu toczenia wpływa na zużycie paliwa, a w związku z tym na koszt transportu samochodowego, emisję CO₂, a także na osiągi samochodów (zdolność przyspieszania, prędkość maksymalna) [3, 10].

Opór toczenia opony wynika ze strat energetycznych powstających podczas regularnego odkształcania się ścianek bocznych, barków oraz bieżnika opony. Pewne straty energetyczne występują również w nawierzchni, ale zazwyczaj są one znikomo małe. Materiały używane do produkcji opon charakteryzują się dużą histerezą, dlatego ilość energii, którą trzeba wprowadzić, żeby odkształcić oponę jest większa niż ilość energii oddawanej w czasie powrotu opony do pierwotnego kształtu. Na ugięcie struktury nośnej opony (ścianek bocznych i pasa bieżnika) mają wpływ przede wszystkim rozmiar opony, ciśnienie pompowania, jej obciążenie oraz do pewnego stopnia sztywność pasa bieżnika oraz ścianek bocznych. Na ugięcie opony oraz zawieszenia pojazdu wpływają nierówności nawierzchni. Jako istotny składnik oporu toczenia pojazdu należy wziąć pod uwagę ugięcia zawieszenia pojazdu powodujące znaczne straty energii [3, 6, 9, 10, 12, 14, 23, 24, 25, 26, 56].

Opór toczenia koła ogumionego, w zależności od metodyki jego wyznaczania, można określić jako:

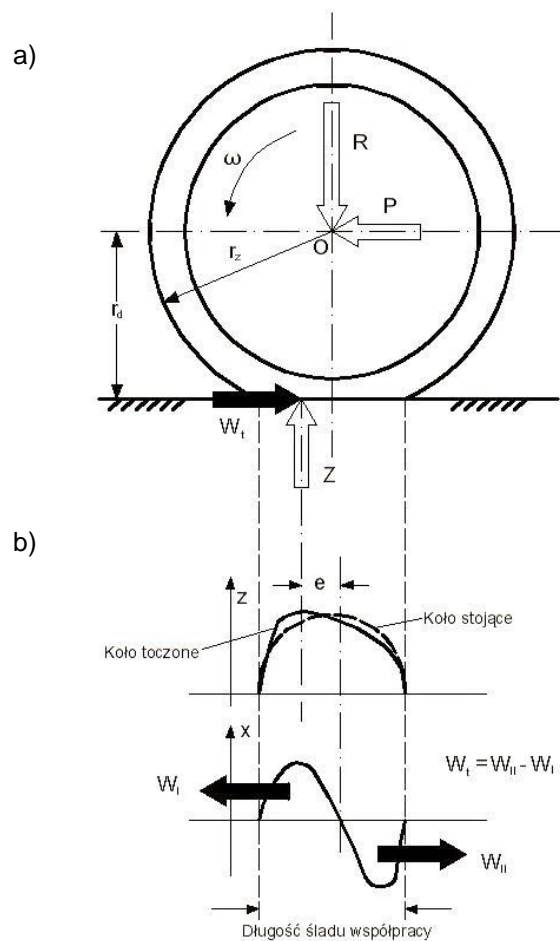
- a) wartość współczynnika oporu toczenia (C_{RR}) wyrażonego stosunkiem siły oporu toczenia (W_t) do normalnej reakcji podłoża, która działa na koło, lub jako wartość siły oporu toczenia (W_t),
- b) ilość energii [Nm] traconej w toczącym się kole na drodze 1 metra,

- c) styczną reakcji do podłoża wywołaną w trakcie toczenia opony; jej ruch występuje na skutek działania siły przyłożonej w środku koła, które nie jest obciążone momentem hamującym i napędowym [6, 15, 50, 76].

Ruch koła ogumionego odbywa się w momencie przyłożeniu do osi koła (O) siły P (Rys. 2). Moment (M_t) przeciwdziała ruchowi koła: $M_t = R \cdot e = Z \cdot e$. Jest to moment oporu toczenia i pochodzi od sił obciążenia pionowego koła (R) i składowej pionowej reakcji podłoża (Z). Odległość (e) nazywana jest ramieniem momentu oporu toczenia. Podczas ruchu jednostajnego zachodzi zależność (równowaga momentów): $M_t = P \cdot r_d = Z \cdot e$. Po podzieleniu obu stron równania przez wartość promienia dynamicznego badanego koła (r_d) uzyskuje się równanie opisane zależnością (6). Stosunek e/r_d , nazywa się współczynnikiem oporu toczenia (C_{RR}) – zależność (7). Wyrażony w taki sposób nie uwzględnia momentu oporu w łożyskach ani momentu wentylacyjnego koła [6].

$$\frac{M_t}{r_d} = R \cdot \frac{e}{r_d} \quad (6)$$

$$C_{RR} = \frac{e}{r_d} \quad (7)$$



Rys. 2 Układ sił działających na koło toczące się pod działaniem siły P: a) siły działające na oponę, b) rozkład nacisków w śladzie styku opona- nawierzchnia. Opracowano na podstawie [6].

Zmniejszenie oporu toczenia może być zrealizowane poprzez [6, 7, 10, 16]:

- a) zmniejszenie masy pojazdu,
- b) doskonalenie konstrukcji opony,
- c) poprawę nawierzchni drogowych.

Według dostępnej literatury i badań własnych najmniejszym oporem toczenia charakteryzują się opony wąskie, o dużej średnicy. Mieszanka gumowa wykorzystana do budowy opony powinna mieć niską histerezę, ale to do pewnego stopnia stoi w sprzeczności z wymogiem zapewnienia dużej przyczepności opony do jezdni [27]. Z uwagi na podatność gumy na przyspieszone starzenie i wynikające z tego obniżanie wytrzymałości mechanicznej opony w wyniku działania wysokiej temperatury, prowadzone są prace nad rozpoznaniem obszarów o największej wartości naprężeń, czyli obszarów, w których rozpraszana jest największa ilość energii. Odnalezienie takich obszarów jest możliwe dzięki badaniu stanu termicznego powierzchni opony i może także doprowadzić do ulepszenia konstrukcji opony [6, 20].

W Tab. 1 przedstawiono współczynniki oporu toczenia uzyskane dla wybranych nawierzchni podczas badania opony Michelin Primacy HP 225/60R16 przy prędkości 50 km/h, obciążeniu 4000 N i regulowanym ciśnieniu pompowania 210 kPa, które wykonane było na torze MNROAD w USA i odcinku testowym w Szwecji z wykorzystaniem przyczepy pomiarowej R² Mk.2., opisanej w rozdziale 3.4 [3, 4]. Analizując dane zawarte w tej tabeli można zauważyć, że najwyższy współczynnik oporu toczenia mają nawierzchnie z powierzchniowym utwaleniem oraz poroelastyczne. Niezależnie od rodzaju nawierzchni jej zanieczyszczenie, np. śniegiem, piaskiem, błotem, powoduje wzrost oporu toczenia [4].

W wyniku przeprowadzonych własnych badań laboratoryjnych oporu toczenia na maszynie bieżnej stwierdzono, że zwiększenie zarówno ciśnienia wewnątrz opony, jak i temperatury otoczenia, skutkuje zmniejszeniem oporu toczenia (Tab. 2, Tab. 4), natomiast zwiększenie obciążenia pionowego opony jest przyczyną zwiększenia współczynnika oporu toczenia (Tab. 3).

Tab. 1 Współczynniki oporu toczenia dla wybranych nawierzchni drogowych [3].

Rodzaj nawierzchni	C_{RR}
Nawierzchnia eksperymentalna pokryta gładką warstwą żywicy epoksydowej	0,008
Beton asfaltowy pokryty farbą termoplastyczną z granulowanym szkłem	0,008
Beton asfaltowy pokryty farbą termoplastyczną z granulowanym szkłem o dużej przyczepności	0,009
Eksperymentalna nawierzchnia SMA8 (Dania)	0,009
SMA8 (Dania)	0,009
Asfalt piaskowy 0/4	0,009
Beton asfaltowy typu ISO 0/6	0,009
SMA11 (modyfikowany gumą)	0,009
SMA11	0,009
Beton asfaltowy 0/10	0,010
Beton cementowy poprzecznie rowkowany	0,010
Beton cementowy przeciągany wzdłużnie grzebieniem	0,010
Nawierzchnia poroelastyczna przyklejona do bloczków betonowych	0,010
Beton cementowy poprzecznie szcztokowany	0,010
Powierzchniowe utrwalenie o podwyższonej przyczepności 1/3 (Colgrip®)	0,010
Beton asfaltowy 8	0,010
Porowaty beton asfaltowy 0/6	0,010
Beton cementowy poprzecznie frezowany	0,010
Beton cementowy przecierany jutą	0,010
SuperPave (USA) 12,5	0,010
SMA8 (Polska)	0,010
Beton asfaltowy 10	0,010
Bloczki betonowe	0,010
Beton cementowy poprzecznie frezowany	0,011
Beton cementowy przeciągany wzdłużnie grzebieniem oraz szlifowany	0,011
Beton cementowy z odsłoniętym kruszywem	0,011
Bardzo cienki dywanik asfaltowy	0,011
Utrwalenie powierzchniowe dwuwarstwowe	0,011
Asfalt porowaty dwuwarstwowy	0,011
Beton cementowy frezowany	0,012
Beton cementowy porowaty	0,012
Asfalt porowaty jednowarstwowy	0,012
Nawierzchnia poroelastyczna HET	0,013
Powierzchniowe utrwalenie 8/10	0,014
Powierzchniowe utrwalenie 0/14	0,016

Tab. 2 Wpływ wzrostu ciśnienia na opór toczenia opon samochodowych przy stałym obciążeniu 4415 N, prędkości nominalnej 80 km/h i temperaturze otoczenia 21°C na nawierzchni DAC16.

Ciśnienie powietrza	[kPa]	250	240	230	220	210	200
Współczynnik oporu toczenia zredukowany do 25°C	[-]	0,0102	0,0105	0,0109	0,0113	0,0117	0,0121

Tab. 3 Wpływ zwiększenia obciążenia pionowego na opór toczenia opon samochodowych przy stałym ciśnieniu 210 kPa, prędkości nominalnej 80 km/h i temperaturze otoczenia 21°C na nawierzchni DAC16.

Obciążenie	[N]	2060	2453	2943	3434	3924	4415
Współczynnik oporu toczenia zredukowany do 25°C	[-]	0,0102	0,0108	0,0112	0,0115	0,0116	0,0118

Tab. 4 Wpływ wzrostu temperatury otoczenia na opór toczenia opon samochodowych przy stałym obciążeniu 4002 N, ciśnieniu 210 kPa i prędkości nominalnej 50 km/h, na nawierzchniach APS4 oraz PERS.

Temperatura otoczenia	[°C]	5,5	17	28	5,5	17	28
Nawierzchnia	[-]	APS4	APS4	APS4	PERS	PERS	PERS
Współczynnik oporu toczenia zredukowany do 25°C	[-]	0,0181	0,0172	0,0164	0,0156	0,0142	0,0134

6. METODY POMIARU OPORU TOCZENIA

6.1. Wprowadzenie

Do badania oporu toczenia opon samochodowych używa się metod laboratoryjnych oraz drogowych. Pierwsze z nich, z uwagi na możliwość kontrolowania oraz utrzymywania stałych warunków pomiarowych, są bardziej dokładne i powtarzalne niż badania drogowe. Wykorzystuje się je dlatego do badania wpływu czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych opony na opór toczenia. Do określania wpływu nawierzchni drogowej na opór toczenia należy posłużyć się badaniami drogowymi [6, 51].

6.2. Laboratoryjne metody pomiaru oporu toczenia

W metodach laboratoryjnych pomiaru oporu toczenia używa się różnego rodzaju maszyn bieżnych. Zalicza się do nich maszyny:

- a) karuzelowe z bieżnią tarczową [21],
- b) z bieżnią taśmową [28],
- c) z bieżnią szufladową [29],
- d) bębnowe [6].

Maszyny karuzelowe były używane jako pierwsze do pomiaru oporu toczenia. Z uwagi na toczenie koła po okrągłej tarczy co powoduje, że porusza się ona po torze krzywoliniowym. Uzyskiwane tą metodą rezultaty były mało dokładne i obecnie nie jest ona wykorzystywana. Uzyskanie warunków pomiarowych najbardziej zbliżonych do tych panujących na drodze jest możliwe w przypadku zastosowania bieżni taśmowej. Pokrycie ruchomej taśmy nawierzchnią o odpowiedniej teksturze jest jednakże trudne albo wręcz niemożliwe. Maszyna pomiarowa, w której montowana jest bieżnia szufladowa musi posiadać napęd o dużej mocy do przesuwania bieżni po specjalnym torze o dużej długości w celu zapewnienia drogi rozbiegu oraz hamowania bieżni [6].

Obecnie najbardziej popularnymi stanowiskami do badań laboratoryjnych oporu toczenia są stanowiska bębnowe o średnicy 1,708 metra lub większej [6, 15, 21, 28, 30, 31, 32, 33]. Choć ich stosowanie jest zalecane w Normie SAE J1269 [34] oraz ISO 28580 [35], to z uwagi na toczenie koła po zewnętrznej krzywiznie bębna, warunki podczas prowadzenia badań odbiegają od rzeczywistych.

Biorąc pod uwagę sposób pomiaru oporu toczenia na maszynach bieżnych można wyróżnić poniższe metody [6]:

- a) pomiaru sił w osi koła,
- b) pomiaru momentu,
- c) wybiegu,
- d) pomiaru mocy elektrycznej.

6.2.1. Metoda pomiaru sił w osi koła

Określenie siły oporu toczenia jest możliwe dzięki pomiarowi sił, które działają na oś badanego koła. Zazwyczaj pomiar jest dokonywany przy użyciu piast pomiarowych. W metodzie tej został wyeliminowany wpływ oporów łożysk maszyny bieżnej, ale wymagane jest bardzo dokładne

ustawienie piasty pomiarowej względem osi bębna. Na końcowy wynik pomiarów może wpływać powietrze wirujące wraz z bębniem pomiarowym [6].

6.2.2. Metoda pomiaru momentu

Do badania oporu toczenia opon samochodowych Normy ISO 28580 [11] i 18164 [35] zalecają stosowanie maszyn bieżnych. W metodzie pomiaru momentu mierzony jest moment napędowy na wale, na którym znajduje się bęben maszyny bieżnej.

Metoda charakteryzuje się [6]:

- a) dużą dokładnością,
- b) niską wrażliwością na błąd wzajemnego ustawienia osi badanego koła wraz z osią bębna maszyny bieżnej,
- c) łatwością pomiaru,
- d) małą czułością na przesunięcia lub odchylenia linii działania siły promieniowej, która obciąża koło wzdłuż prostej normalnej do powierzchni bębna i która przechodzi przez środek badanego koła,
- e) możliwością dokładnego pomiaru momentu, dzięki któremu może być określony opór toczenia.

Udoskonalenie technik badawczych umożliwiło eliminację wpływu niestabilnej prędkości obrotowej bębna oraz transmisji sygnałów pomiarowych z wirujących elementów na opór toczenia. W dalszym ciągu należy natomiast przeprowadzać korektę na opory łożysk bębna oraz piasty koła [6, 36, 37, 38, 39, 77].

6.2.3. Metoda wybiegu

W metodzie wybiegu, dopuszczanej przez normę ISO 18164 [35], wykorzystuje się spadek prędkości obrotowej bębna maszyny pomiarowej spowodowany oporem toczenia toczącego się po nim koła w funkcji czasu. Pomiar wykonywany jest po odłączeniu układu napędowego maszyny bieżnej [21].

6.2.4. Metoda pomiaru mocy elektrycznej

W metodzie pomiaru mocy elektrycznej opór toczenia określany jest na podstawie badania mocy prądu zasilającego silnik, który napędza bęben maszyny bieżnej [6, 30]. Koło badawcze jest toczone po bieżni bębna z zadaną prędkością. Wadami powyższej metody są straty energii w układzie elektrycznym silnika oraz wpływ oporów łożyskowania maszyny bieżnej na końcowe wyniki pomiarów [6].

6.3. Drogowe metody pomiaru oporu toczenia

Drogowe metody pomiaru oporu toczenia wykorzystywane są w celu klasyfikacji nawierzchni drogowych oraz opon pod względem oporu toczenia. Badania drogowe mogą być wykonywane przy użyciu [6, 10, 50, 76, 79, 80]:

- a) pojazdu badawczego wyposażonego w odpowiednie opony,
- b) przyczepy dynamometrycznej.

6.3.1. Metody badania oporu toczenia za pomocą pojazdu badawczego

W celu określenia współczynnika oporu toczenia w warunkach drogowych przy pomocy samochodu badawczego, można wyróżnić poniższe metody pomiarowe [6]:

- a) metoda oparta na pomiarze zużycia paliwa,
- b) metoda wybiegu,
- c) metoda holowania badanego pojazdu,
- d) metoda oparta na pomiarze momentu napędowego.

Wadami metod pomiaru oporu toczenia przy użyciu pojazdu badawczego jest to, że do badań używane są wszystkie koła pojazdu badawczego. Oprócz tego wykonywane pomiary mogą być zakłócone przez źle ustawioną geometrię kół, opory układu napędowego, stan zawieszenia i układu hamulcowego oraz wiatr. W celu wyeliminowania takich zakłóceń badania pomiarów oporu toczenia należy prowadzić przy użyciu przyczepy dynamometrycznej [6].

6.3.1.1. Metoda oparta na pomiarze zużycia paliwa

Metoda oparta na pomiarze zużycia paliwa służy do pośredniego określania oporu toczenia pojazdu badawczego. Pomiary należy wykonywać w ustalonych warunkach. Na końcowy wynik znacząco wpływa powtarzalność warunków jazdy oraz stan silnika samochodu [6, 15, 41].

6.3.1.2. Metoda wybiegu

W metodzie wybiegu mierzy się odcinek drogi przebyty w wyniku działania siły bezwładności przez rozpędzony pojazd badawczy po odłączeniu napędu. W związku z istnieniem oporów ruchu pojazd wytraca swoją prędkość. Przy prędkości względem powietrza poniżej 15 km/h można pominąć opór powietrza i zmierzony opór traktować jako opór toczenia. Powyższa metoda nie może być stosowana dla dużych prędkości, dla których opór powietrza jest większy niż opór toczenia [6].

6.3.1.3. Metoda holowania badanego pojazdu

W metodzie holowania pojazdu przeważnie wolnobieżny pojazd badawczy wyposaża się w osłonę aerodynamiczną oraz opony wzorcowe i ciągnie się po poziomej, płaskiej nawierzchni ze stałą prędkością [15]. Mierzenie siły oporu toczenia jest możliwe dzięki układowi dynamometrycznemu zamontowanemu w elementach, które przenoszą siłę pociągową. Podczas wykonywania pomiarów oporu należy zachować stabilną prędkość [6].

6.3.1.4. Metoda oparta na pomiarze momentu napędowego

Metoda opiera się na pomiarze momentu napędowego z użyciem momentomierza założonego, np. na wale napędowym. Moment ten jest przekazywany do kół napędowych pojazdu badawczego [6, 30]. Tak jak w przypadku wcześniej opisanych metod przy prędkościach poniżej 15 km/h można pominąć opór powietrza i zmierzony opór traktować jako opór toczenia. Metoda stosowana była praktycznie do określania oporów toczenia opon rolniczych [6].

6.3.2. Metody pomiaru oporu toczenia za pomocą przyczep dynamometrycznych

Pierwsza przyczepa do badania zarówno przyczepności, jak i oporu toczenia, została zbudowana przez Czudakowa [6, 42]. Zasada jej działania opierała się na mierzeniu sił poprzecznych i wzdłużnych, działających na badane koło w trakcie jego toczenia, z użyciem hydraulicznych

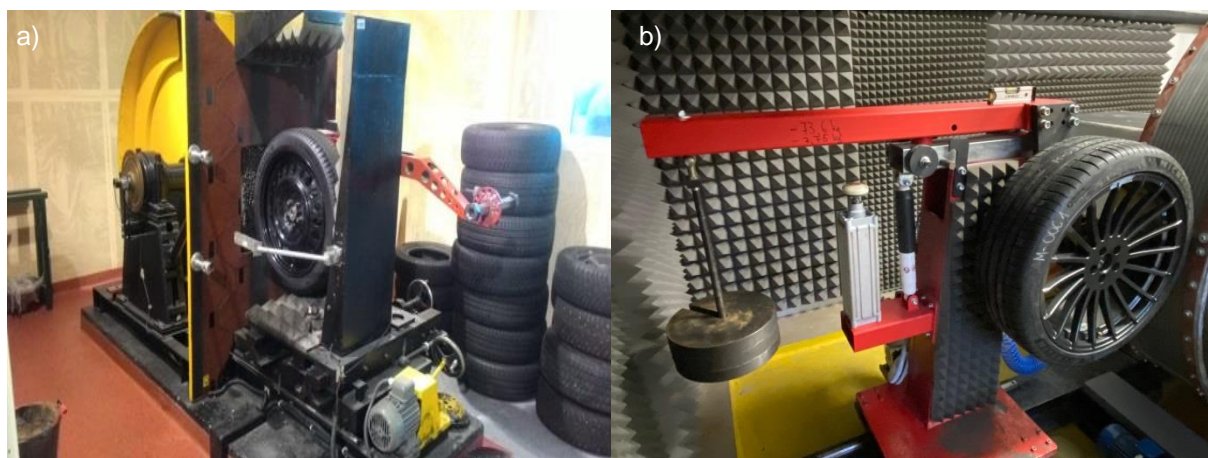
przetworników siły. Z uwagi na niewystarczającą dokładność pomiaru współczynnika oporu toczenia, przyczepy takiego typu nie znajdują już zastosowania.

W latach 80. ubiegłego stulecia w Centre de Rechercher Routieres w Belgii została zbudowana przyczepa do pomiaru oporu toczenia, która wykorzystywała zasadę uchylnego wahacza pionowego. Ta nowatorska koncepcja pomiaru, w ramach międzynarodowej współpracy naukowej, była rozwijana w Zakładzie Pojazdów Mechanicznych i Technik Militarnych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej (dawniej Zespół Pojazdów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej, ZP WM). Aktualnie, w najnowszej przyczepie do badań oporu toczenia, uwzględnione są czynniki wpływające na wartość oporu toczenia, m. in. pochylenie drogi i przyczepy, zmiany ciśnienia w ogumieniu, przyspieszenia wzdłużne [6].

Pomiar siły oporu toczenia może być w sposób precyzyjny wykonywany w warunkach drogowych wyłącznie przy użyciu specjalnej przyczepy wyposażonej w układ pomiarowy o wysokiej czułości, ponieważ siła oporu toczenia jest dwa rzędy wielkości mniejsza od siły przyczepności ogumionego koła odkształconego i obciążonego. Przyczepa do pomiaru oporu toczenia musi być wyposażona w układy wyrównywania wpływu elementów zakłócających pomiary [10, 68, 80].

6.4. Metody pomiaru oporu toczenia wykorzystywane w Zakładzie Pojazdów Mechanicznych i Technik Militarnych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej

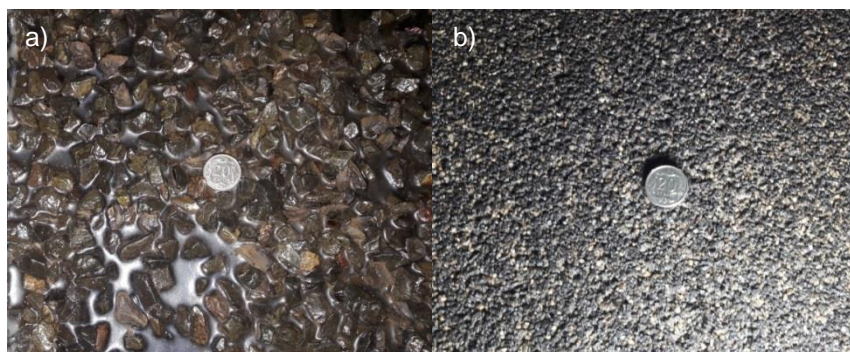
W Zakładzie Pojazdów Mechanicznych i Techniki Militarnej PG badania oporu toczenia w warunkach laboratoryjnych wykonuje się na dwóch maszynach bieżnych o średnicy bębna 1,708 m i 2,050 m (Rys. 3). W obu przypadkach bęben maszyny bieżnej napędzany jest za pomocą silnika elektrycznego poprzez przekładnię pasową. Koło badawcze jest przesuwane po prowadnicach liniowych, a jego ruch realizowany jest za pomocą śruby trapezowej napędzanej silnikiem elektrycznym. Maszyny te oraz nawierzchnie badawcze zostały zaprezentowane w kolejnych podrozdziałach.



Rys. 3 Maszyny bieżne do badania hałasu i oporu toczenia opon i nawierzchni o średnicy bębna równej: a) 1,708 m, b) 2,050 m.

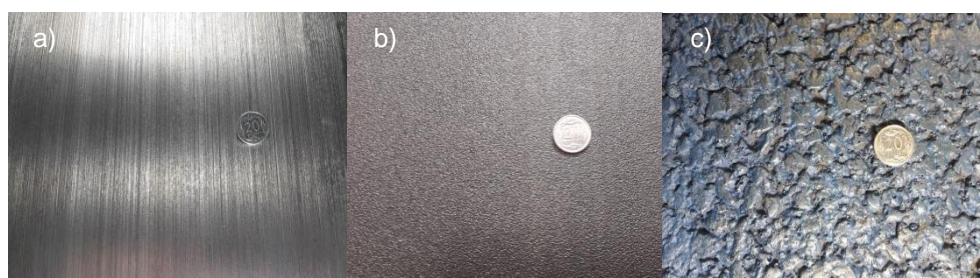
Na maszynie bieżnej o średnicy bębna 1,708 m (Rys. 3a) bada się aktualnie opór toczenia opon samochodowych na nawierzchniach:

- a) APS-4 – imitacji szorstkiej nawierzchni drogowej, która została wykonana jako powierzchniowe utrwalenie. Nawierzchnia APS-4 ma poliuretanową bazę, w której znajduje się grys o średnicy ziaren 8-12 mm (Rys. 4a) [6].
- b) poroelastycznej, w skład której wchodzi granulata pozyskany ze zużytych opon, kruszywo mineralne oraz spoiwo poliuretanowe. Nawierzchnie poroelastyczne posiadają bardzo dobre właściwości samoczyszczące (Rys. 4b) [6, 73, 74].



Rys. 4 Nawierzchnie przyklejone do stalowego bębna o średnicy 1,708 m: a) APS-4, b) poroelastyczna.






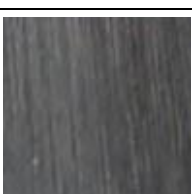

Stalowy bęben maszyny pomiarowej o średnicy 2,050 m został podzielony na trzy pasy. Pierwszy pas nie jest niczym pokryty i stanowi zewnętrzną bieżnię stalową. Środkowy pas pokryty jest gładką nawierzchnią SW-80. Na trzecim pasie zamontowane są repliki rzeczywistych nawierzchni drogowych (Rys. 5). Nawierzchnia stalowa oraz nawierzchnia SW-80 są uznawane za standardowe w badaniach oporu toczenia opon samochodowych [35]. Przedstawiona na Rys. 5 nawierzchnia SMA8 jest demontowalna. W jej miejsce możliwe jest mocowanie praktycznie dowolnej repliki nawierzchni drogowej. Nawierzchnia SMA8 jest repliką nawierzchni drogowej będącej mieszanką mineralno-asfaltową o dużej zawartości grysów. W ramach prowadzonych prac badawczych, oprócz nawierzchni SMA8, wykonano repliki nawierzchni APS4, imitującej powierzchniowe utrwalenie 8/10, oraz ISO20, repliki według wymagań normy ISO (Tab. 5). W Zakładzie Pojazdów Mechanicznych i Techniki Militarnej PG wykonywane są repliki wszystkich nawierzchni wykorzystywanych do badań na maszynie bieżnej.



Rys. 5 Nawierzchnie, w które wyposażone jest stalowy bęben o średnicy 2,050 m: a) stalowa powierzchnia, b) naklejona nawierzchnia SW-80, c) przykręcona replika nawierzchni SMA8.

W Tab. 5 przedstawiono zestawienie zdjęć replik nawierzchni, wraz ze średnią głębokością MPD, stosowanych do badań laboratoryjnych oporu toczenia. Nawierzchnie te są montowane na maszynach bieżnych Politechniki Gdańskiej.

Tab. 5 Zestawienie wybranych replik nawierzchni wykorzystywanych w badaniach laboratoryjnych [3].

Oznaczenie*	Zdjęcie nawierzchni	Opis	MPD (mm)
APS4r17		Replika imitująca powierzchniowe utwardzenie 8/10. Kruszywo mineralne zatopione w poliuretanowej żywicy	4,75
PERSr17		Nawierzchnia poroelastyczna z kruszywem 4 mm	1,53
DAC16r20		Replika betonu asfaltowego z kruszywem 16 mm wykonana z laminatu epoksydowego	1,33
ISOr20		Replika nawierzchni standardowej wg normy ISO wykonana z laminatu epoksydowego	1,06
SMA8r20		Replika SMA 8 wykonana z laminatu epoksydowego	1,31
STEELr20		Gładka nawierzchnia stalowa	0,42
SWr20		Safety Walk – materiał przypominający papier ścierny o granulacji 80	0,84

* symbole r17 i r20 oznaczają średnice bębna maszyny bieżnej, wynoszące, odpowiednio, 1,7 i 2 m.

Od lat 90. ubiegłego wieku ZP WM zajmuje się pomiarami siły oporu toczenia opon oraz nawierzchni drogowych. Początkowo do badań wykorzystywano specjalistyczną przyczepę badawczą, skonstruowaną w Zespole Pojazdów na przełomie 2002 i 2003 roku. W latach 2012-2013 w ZP WM zaprojektowano i zbudowano nową wersję specjalistycznej przyczepy do pomiaru siły oporu toczenia opon oraz nawierzchni drogowych nazwaną R² Mk.2. (Rys. 6).

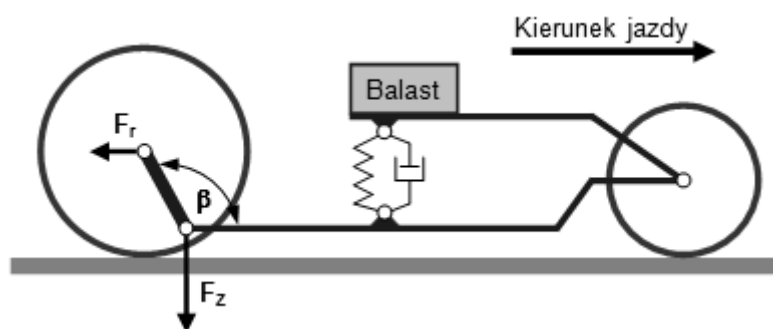


Rys. 6 Przyczepa R² Mk.2. do badania oporu toczenia opon samochodowych.

Przyczepa dynamometryczna R² Mk.2. wyposażona jest w dwa przednie koła prowadzące oraz tylne koło badawcze, które jest ułożyskowane w pionowym wahaczu. Podczas jazdy siła oporu toczenia koła tylnego wywołuje wychylenie wahacza pionowego z położenia równowagi o kąt β , który jest miarą siły oporu toczenia (Rys. 7). W wyznaczeniu oporu toczenia przy użyciu przyczepy dynamometrycznej zazwyczaj nie wykorzystuje się bezpośredniego pomiaru siły oporu toczenia z uwagi na dużą trudność w uzyskaniu dobrej dokładności. Współczynnik oporu toczenia wyrażony jest poniższym wzorem (8) [80]:

$$C_{RR} = \frac{F_{RR}}{Q} \quad (8)$$

gdzie: C_{RR} - współczynnik oporu toczenia, F_{RR} - siła oporu toczenia, Q - siła normalna do nawierzchni, która obciąża koło.



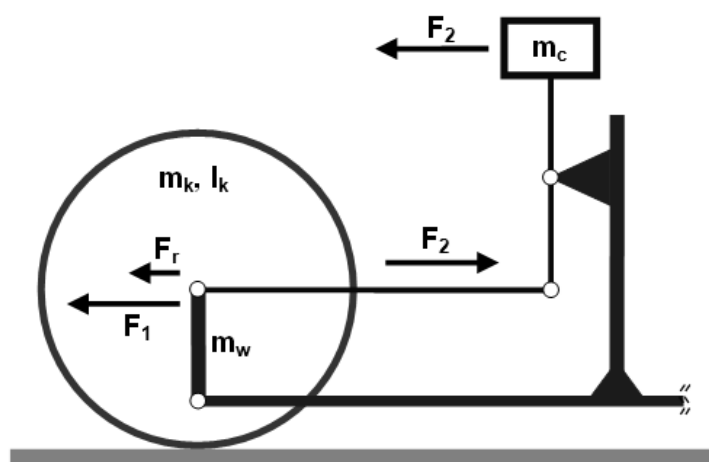
Rys. 7 Metoda pomiaru współczynnika C_{RR} przy wykorzystaniu odchylanego wahacza pomiarowego, gdzie: F_r - siła oporu toczenia, β - kąt o jaki siła oporu toczenia oddziałująca na koło badane wychyla wahacz pionowy z położenia równowagi, F_z - siła normalna do nawierzchni, która obciąża koło badane [68].

Podczas prowadzenia badań drogowych na uchylny wahacz pomiarowy przyczepy badawczej R² Mk.2., oprócz siły oporu toczenia, działają siły wynikające ze zmiennej prędkości jazdy związane z bezwładnością wahacza pomiarowego i koła badanego oraz siły wynikające z jazdy po wzniesieniu. Teoretycznie, celem wykluczenia sił zakłócających, pomiar oporu toczenia należałoby badać wyłącznie ze stałą prędkością przejazdu na poziomych nawierzchniach. Takie podejście ograniczałoby jednak możliwości pomiarowe tylko do specjalnie stworzonych odcinków testowych. W celu przeciwdziałania siłom zakłócającym pomiary przy jeździe ze zmienną prędkością oraz przy jeździe po wzniesieniu został opracowany oraz opatentowany [Patent nr 213120] nowatorski układ kompensujący wpływ przyspieszenia, a także wzniesienia. Na Rys. 8 przedstawiono urządzenie pomiarowe przyczepy badawczej łącznie z systemem kompensacji [10, 68], a na Rys. 9 jego schemat funkcjonalny.



Rys. 8 Urządzenie pomiarowe przyczepy pomiarowej R² Mk.2.

Na Rys. 9 przedstawiono schemat funkcjonalny urządzenia pomiarowego przyczepy badawczej.



Rys. 9 Schemat funkcjonalny urządzenia pomiarowego przyczepy badawczej R² Mk.2., gdzie: m_c - masa oddziałująca na koło, m_k - masa koła badanego, m_w - masa wahacza pomiarowego, I_k - moment bezwładności koła badanego [68].

Przyczepa badawcza R² Mk.2. w czasie wykonywania badań drogowych oporu toczenia jest ciągnięta przez pojazd wyposażony w tempomat. W związku z tym prędkość jazdy w czasie badań jest utrzymywana na prawie stałym poziomie.

Przyczepa badawcza R² Mk.2. pozwala na wykonywanie dokładnych pomiarów współczynnika oporu toczenia z bardzo dobrą powtarzalnością. Wartości współczynnika oporu toczenia wyznaczone są dla każdego metra przejechanej drogi. Poza tym przyczepa badawcza umożliwia wykonywanie pomiaru MPD, a także wzdłużnego profilu nawierzchni. Dokładne lokalizowanie odcinków badawczych jest możliwe dzięki zapisywaniu współrzędnych geograficznych. Obecnie przyczepa badawcza R² Mk.2. jest uznawana za najbardziej zaawansowaną przyczepę do pomiaru oporu toczenia opon na świecie [80].

7. WPŁYW TEKSTURY NAWIERZCHNI NA OPÓR TOCZENIA OPON SAMOCHODOWYCH

Na opór toczenia wpływają nie tylko czynniki konstrukcyjne i eksploatacyjne opony, ale również tekstura nawierzchni drogowej. Norma ISO 13473-2:2002 [44] określa teksturę nawierzchni jako różnicę pomiędzy powierzchnią rzeczywistej nawierzchni drogowej a idealnie gładką. Teksturę nawierzchni określają parametry geometryczne wyznaczane w sposób bezpośredni na podstawie profilu badanej nawierzchni, a także parametry określane na podstawie analizy widmowej.

Do najważniejszych parametrów wyznaczanych na podstawie profilu należą [45, 86]:

- a) głębokość tekstury (z ang. *Texture Depth, TD*) wyznaczana jako odległość pomiędzy płaszczyzną a powierzchnią przechodzącą przez wierzchołki trzech najwyższych występow analizowanej nawierzchni,
- b) średnia głębokość tekstury (z ang. *Mean Texture Depth, MTD*) określana metodą objętościową, np. przy pomocy piasku. Zazwyczaj płaszczyzna wykorzystywana przy pomiarach metodą objętościową nie jest w pełni sztywne i ulega pewnym deformacjom, co powoduje odstępstwa od TD,
- c) głębokość profilu (z ang. *Profile Depth, PD*) wyrażana jako odległość pomiędzy profilem a prostą poziomą przechodzącą przez najwyższy wierzchołek występujący w obrębie odcinka bazowego. Odcinek bazowy profilu ma długość zbliżoną do długości śladu styku opony z nawierzchnią (zazwyczaj około 100 mm),
- d) średnia głębokość profilu (z ang. *Mean Profile Depth, MPD*) określana jako średnia wartość głębokości profilu na odcinku bazowym zgodnie z normą ISO 13473-1,
- e) szacunkowa głębokość tekstury (z ang. *Estimated Texture Depth, ETD*) jest odpowiednikiem MTD. Nie jest wartością pomiarową, ale oblicza się ją z MPD:

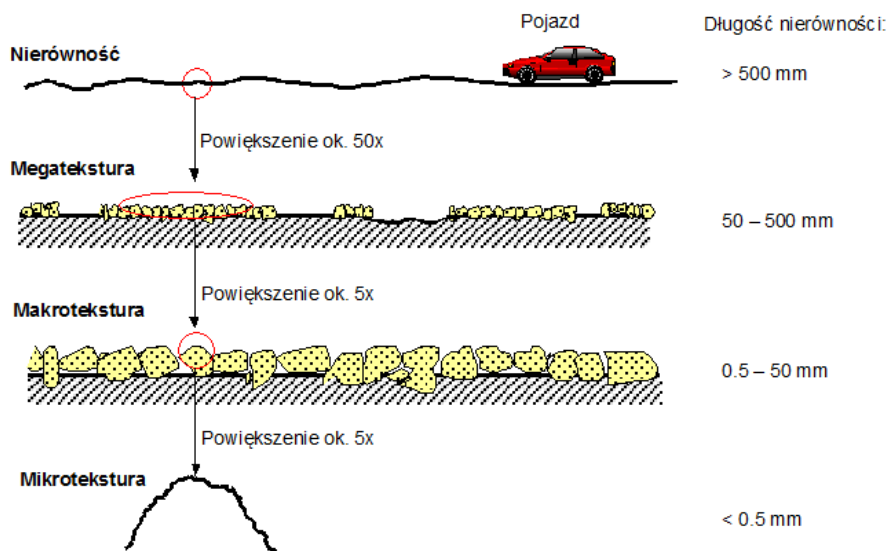
$$ETD = 0,2 + 0,8 \cdot MPD \text{ [mm]} \quad (9)$$

Na podstawie analizy widmowej, biorąc pod uwagę długość fali, można określić poniższe parametry tekstury nawierzchni (Rys. 10) [6, 45]:

- a) nierówności: długość fali powyżej 500 mm,
- b) megatekstura: długość fali od 50 - 500 mm, a amplituda dla standardowych nawierzchni pomiędzy wartością minimalną oraz maksymalną wynosi 0,1 - 50 mm,
- c) makrotekstura: długość fali od 0,5 - 50 mm, a amplituda dla standardowych nawierzchni pomiędzy wartością minimalną oraz maksymalną wynosi 0,1 - 20 mm,
- d) mikrotekstura: długość fali poniżej 0,5 mm, a amplituda dla standardowych nawierzchni pomiędzy wartością minimalną oraz maksymalną wynosi 0,001 - 0,5 mm.

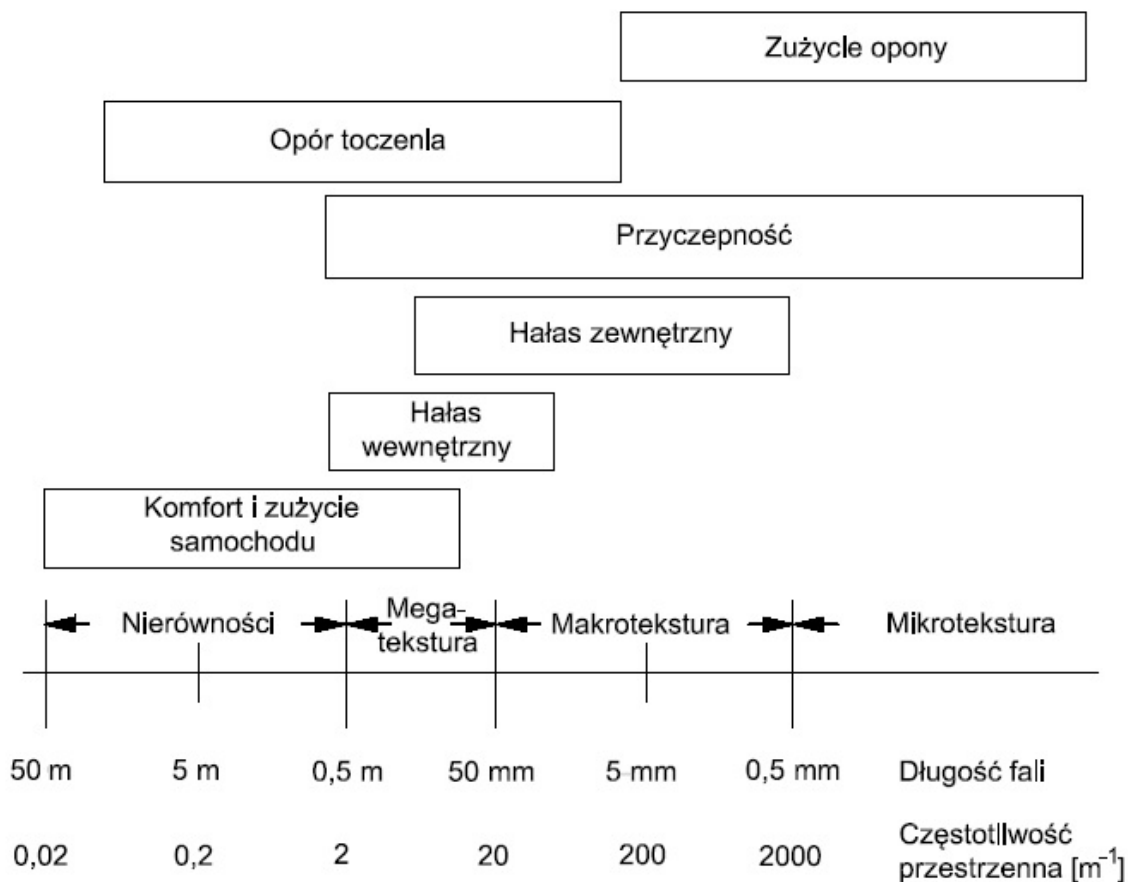
Makrotekstura zawiera długości fal podobne do wielkości geometrycznych elementów bieżników opon samochodowych, a megatekstura zawiera długości fal przybliżone do długości śladu styku opony z nawierzchnią [6].





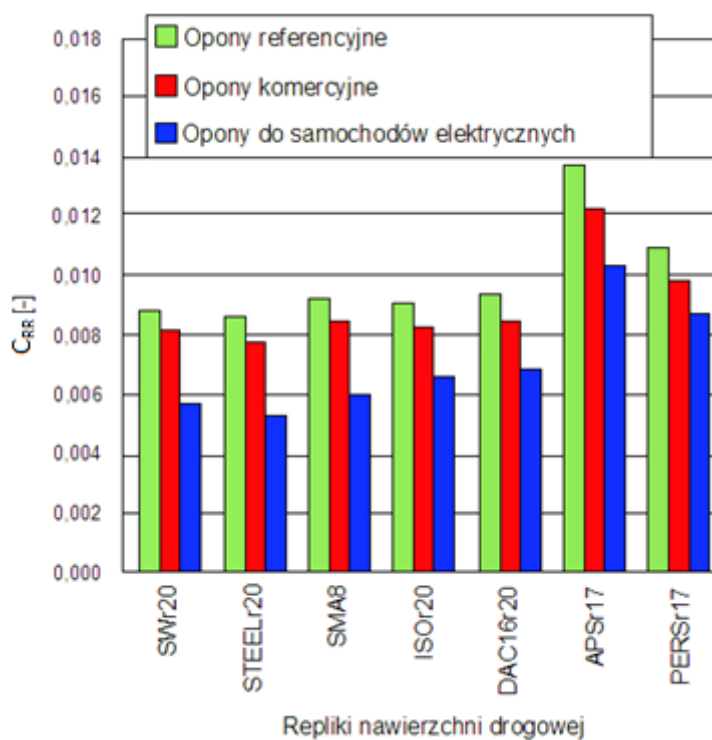
Rys. 10 Uproszczony schemat poszczególnych zakresów tekstury nawierzchni drogowej [45].

Zwiększenie wartości makrotekstury i megatekstury powoduje większe odkształcenia opony, co wywołuje większe straty histerezy. Nierówności megatekstury są ponadto przyczyną powstawania przemieszczeń w zawieszeniu samochodowym, co powoduje zwiększenie oporu toczenia (Rys. 11).



Rys. 11 Zakresy tekstury oraz jej wpływ na współpracę opony z nawierzchnią badawczą. Opracowano na podstawie [46].

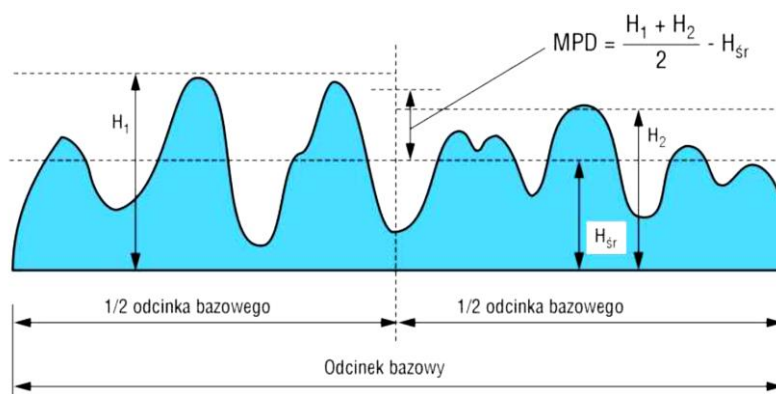
Z przeprowadzonych na Politechnice Gdańskiej badań według normy ISO 28580 (2009) wynika, że niezależnie od zastosowanego rodzaju opon spośród 7 różnych zbadanych nawierzchni, największy opór toczenia występuje dla APS4r17, która stanowi replikę nawierzchni o powierzchniowym utrwaleniu. Drugą największą wartość oporu toczenia uzyskano dla bardzo gładkiej poroelastycznej nawierzchni PERSr17. W tym drugim przypadku wysoka wartość oporu toczenia nie jest związana z teksturą, ale z dużą elastycznością tej nawierzchni. Wykazano, że przy intensywnej pracy maszyny bieżnej nawierzchnia PERSr17 w obszarze współpracy z oponą testową nagrzewała się w znacznym stopniu, co potwierdziło hipotezę o stratach energetycznych zachodzących w tej nawierzchni. Dla pozostałych replik, mimo istotnych różnic w wartościach MPD (0,42 - 1,33 mm) dla opon referencyjnych i komercyjnych, współczynniki oporu toczenia są zbliżone. Opony przeznaczone do samochodów elektrycznych wykazują o około 20-30% mniejszy opór toczenia (Rys. 12) [3].



Rys. 12 Współczynniki oporu toczenia uśrednione dla poszczególnych grup opon. Opracowano na podstawie [3].

8. PROCEDURA OKREŚLANIA ŚREDNIEJ GŁĘBOKOŚCI PROFILU (MPD)

Zgodnie z normą ISO 13473-1 obowiązuje specjalna procedura określania MPD. Znormalizowany odcinek bazowy profilu o długości 100 ± 10 mm dzieli się na dwie równe części. Dla każdej połowy określana jest wysokość najwyższego wierzchołka w odniesieniu do poziomu zerowego stanowiącego jednocześnie średnią amplitudę profilu (Rys. 13). Wysokość dwóch otrzymanych wierzchołków jest uśredniana. Ponieważ w wyniku normalizacji profilu jego wartość średnia na długości odcinka bazowego wynosi zero, więc średnia wysokość wierzchołków stanowi MPD. Profil nawierzchni należy odwzorować z wymaganą dokładnością, umożliwiającą wyliczenie w czasie rzeczywistym wskaźnika MPD zgodnie z normą ISO 13473-1 dla odcinka bazowego w co najmniej jednym śladzie kół według schematu przedstawionego poniżej (Rys. 13) [48, 49, 52, 86].



Rys. 13 Zasada określenia wskaźnika MPD [52].

9. MIĘDZYNARODOWY WSKAŹNIK RÓWNOŚCI

Międzynarodowy wskaźnik równości (z ang. *International Roughness Index*, IRI), wyrażany w mm/m lub m/km, jest miarą równości podłużnej nawierzchni, a jego wartość jest równa sumie wzajemnych przemieszczeń dwóch mas: pojazdu oraz koła w obliczeniowym modelu pojazdu samochodowego, wywołanych przez nierówności rzeczywistego profilu drogi, na jednostkowym odcinku drogi. Parametr IRI charakteryzuje komfort jazdy poprzez symulację pracy zawieszenia umownego pojazdu poruszającego się na długości analizowanego odcinka nawierzchni z prędkością 80 km/h. Określenie wskaźników IRI powinno być wykonane za pomocą sprawdzonego programu obliczeniowego zgodnie z procedurą obliczeniową przeprowadzaną wg normy ASTM E1926-08 [57, 59, 60, 61, 62].

Wskaźnik IRI wykorzystuje się do oceny równości podłużnej warstwy ścieralnej nawierzchni drogi klasy G oraz dróg wyższych klas dla odcinków o długości 50 m. Dozwolone wartości wskaźnika IRI wymagane przy odbiorze nawierzchni drogowej określone zostały w rozporządzeniu dotyczącym warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne [58].

10. BADANIE TEKSTURY NAWIERZCHNI

Badania tekstury nawierzchni mogą być prowadzone przy użyciu różnych metod: objętościowej, wypływu cieczy, pomiaru profilometrem laserowym, fotografii, odciskowej [45]. Niektóre metody są zgodne z przyjętymi międzynarodowymi standardami określania tekstury nawierzchni drogowej. W zależności od przyjętej metody rezultatem pomiarów tekstury nawierzchni jest zazwyczaj MTD lub MPD [45].

Wg Sandberga [54] zwiększenie tekstury nawierzchni oraz pogorszenie równości nawierzchni, wyrażone, odpowiednio, jako zwiększenie wskaźnika MPD oraz IRI, powodują zwiększenie oporu toczenia. Ejsmont w swoich badaniach wykazał, że wpływ wskaźnika MPD na opór toczenia nie jest tak znaczący jak wcześniej opisywano [55, 75]. Na nawierzchniach odznaczających się dużą wartością wskaźnika IRI znaczące straty energii powstają w elementach tłumiących zawieszenia pojazdu. Ma to bezpośredni wpływ na zwiększenie temperatury amortyzatorów pojazdu. W czasie jazdy na nawierzchni o dużej wartości wskaźnika IRI następuje także zwiększenie strat energetycznych w samych oponach [10, 53, 63].

10.1. Metoda objętościowa

Metoda objętościowa została w sposób szczegółowy opisana w aneksie A normy międzynarodowej ISO 10844 [47]. Metoda ta została wynaleziona w latach 60. w Anglii przez naukowców z Road Research Laboratory (aktualnie Transport Research Laboratory– TRL) i jest obecnie powszechnie stosowana na całym świecie. Jest uważana za pierwszy międzynarodowy standard badania tekstury nawierzchni drogowej. Polega ona na rozproszczeniu materiału ziarnistego (np. kulek szklanych) o objętości 25 cm^3 na czystej i suchej nawierzchni, zmierzeniu wielkości powierzchni pokrytej przez ten materiał, a następnie obliczeniu średniej głębokości makrotekstury, którą jest średnia grubość warstwy materiału rozproszzonego na nawierzchni (Rys. 14) [45].



Rys. 14 Pomiar tekstury nawierzchni metodą objętościową [46].



W standardzie międzynarodowym przyjmuje się stosowanie jedynie szklanych kulek jako rozproszanego materiału. Norma brytyjska dopuszcza wykorzystanie do badań piasku. W przypadku bardzo gładkich nawierzchni zdarza się wykorzystywanie smaru jako rozproszanego materiału.

Metoda objętościowa nie jest zbyt precyzyjna, szczególnie do badania nawierzchni gładkich. Na końcowy wynik pomiarów znaczący wpływ ma osoba przeprowadzająca eksperyment, ponieważ efekt końcowy zależy od sposobu dociskania narzędzia rozproszającego materiał ziarnisty i może się różnić nawet o $\pm 0,15$ mm. Problemem podczas stosowania metody objętościowej mogą być ponadto warunki atmosferyczne oddziałujące na jakość wykonywanych badań.

10.2. Metoda wypływu cieczy

Metoda wypływu cieczy (Rys. 15) polega na pomiarze wypływu wcześniej określonej ilości wody (zazwyczaj 1 dm^3) spod gumowej podkładki znajdującej się na badanej nawierzchni. Metoda ma zastosowanie w przypadku nawierzchni gładkich, natomiast nie nadaje się do badań w przypadku szorstkich nawierzchni [45].



Rys. 15 Pomiar tekstury nawierzchni metodą wypływu cieczy [46].

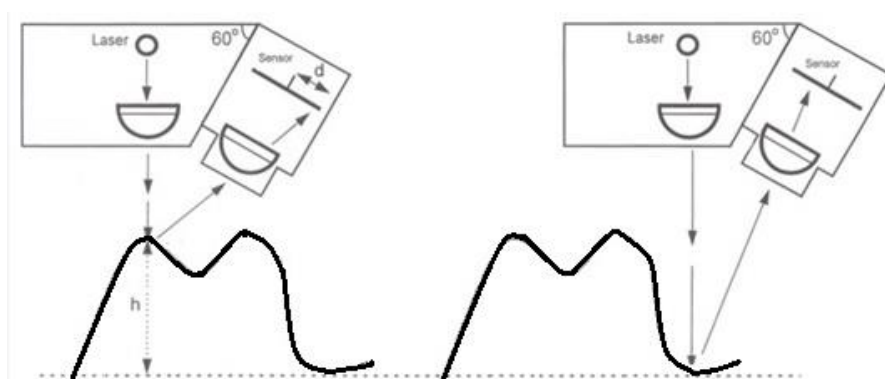
10.3. Metoda pomiaru profilometrem laserowym

Metoda pomiaru profilometrem laserowym aktualnie znajduje najszersze zastosowanie wśród wszystkich metod badania tekstury nawierzchni drogowej. Polega ona na numerycznym odwzorowaniu tekstury nawierzchni jezdni przy użyciu profilometru laserowego [45].



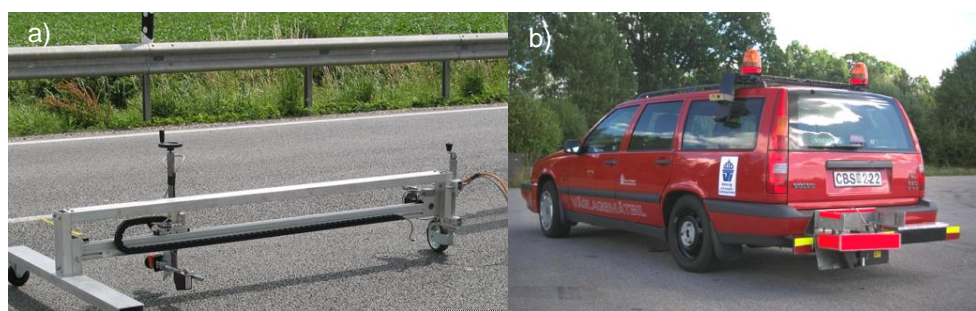
Laser pomiarowy wysyła plamkę na badaną powierzchnię. Obraz plamki przy użyciu odbiornika jest rzutowany na światłoczuły sensor przemieszczenia. Na podstawie odczytu przemieszczenia d obrazu plamki obliczana jest zmiana wysokości profilu powierzchni h . Zazwyczaj kąt pomiędzy wysyłanym a odbitym promieniem lasera ma wartość 30° (Rys. 16). Sam laser wraz z odbiornikiem stanowią tylko część profilometru. Do pozostałych elementów urządzenia badawczego zalicza się [45]:

- a) przetworniki analogowo-cyfrowe,
- b) system przetwarzania i obróbki sygnału,
- c) komputer,
- d) analizator widmowy,
- e) zasilacz.



Rys. 16 Pomiar tekstury powierzchni profilometrem laserowym [46].

Do badań tekstury powierzchni może być użyty profilometr stacjonarny lub mobilny (Rys. 17) [6]. W przeciwieństwie do wyżej opisanych metod, sposób z wykorzystaniem profilometru laserowego może być wykorzystywany zarówno dla gładkich, jak i szorstkich powierzchni drogowych. Użycie mobilnego profilometru umożliwia ponadto przeprowadzenie badań seryjnych. Samochód z zamontowanym profilometrem może wykonywać pomiary tekstury powierzchni jadąc z prędkością nawet 30 - 40 km/h, stąd metoda profilometryczna jest znacznie szybsza od pozostałych metod badania profilu powierzchni. Szczegółowy opis metody badania tekstury powierzchni drogowej za pomocą profilometru można znaleźć w międzynarodowej normie ISO 13473-1 [48].



Rys. 17 Metody pomiaru tekstury powierzchni profilometrem laserowym: a) stacjonarnym, b) mobilnym [46].

10.4. **Metoda fotografii stereograficznej**

Metoda fotografii stereograficznej (metoda Schonfelda) polega na analizie fotografii w technice stereograficznej. Na jej podstawie wyliczane są wartości opisujące teksturę nawierzchni. Metoda ta jest obecnie rzadko wykorzystywana w związku z postępowaniem w automatycznej analizie obrazu i w technikach obliczeniowych, ma jednak duży potencjał rozwojowy. Do zalet metody fotografii stereograficznej zalicza się możliwość trójwymiarowej analizy badanej nawierzchni, podczas gdy w wyżej opisywanych metodach analizuje się tylko płaski przekrój nawierzchni [45].

10.5. **Metoda odciskowa**

W metodzie odciskowej odcisk rzeczywistej nawierzchni drogowej poddawany jest dokładnej analizie z wykorzystaniem komputerowej obróbki obrazu. Analogicznie jak w przypadku metody fotografii stereograficznej, obecnie nie jest praktycznie wykorzystywana do pomiarów tekstury nawierzchni drogowej z powodu czasochłonności przygotowania próby do analizy [45].

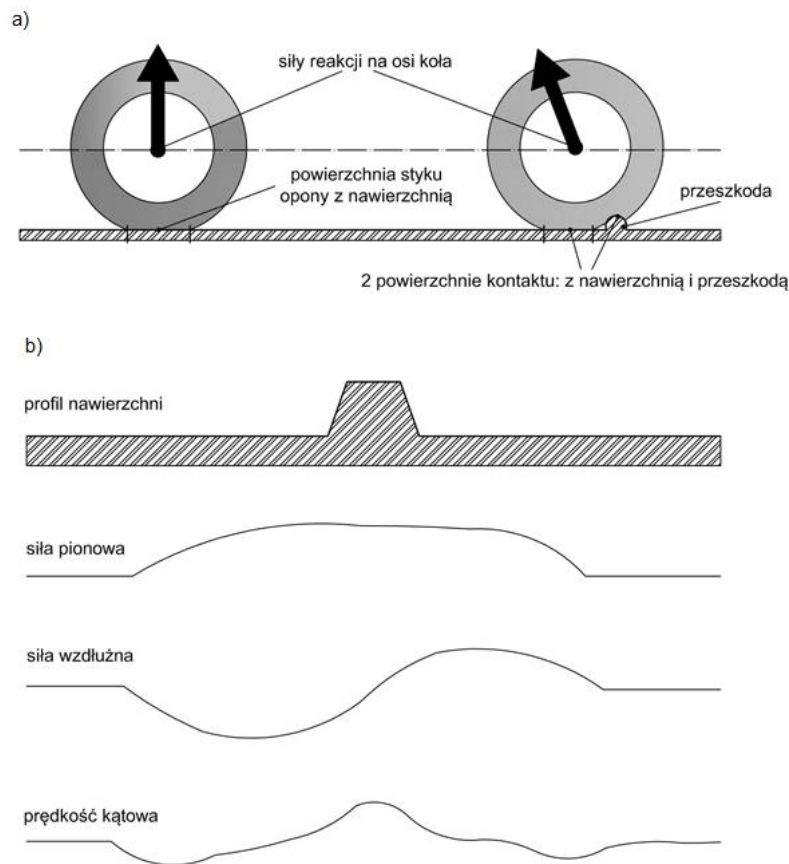
11. OTULENIE NAWIERZCHNI PRZEZ ELEMENTY BIEŻNIKA UGIĘTEJ OPONY

Otulanie nawierzchni to interakcje zachodzące pomiędzy elementami bieżnika opony a nawierzchnią. Podczas kontaktu z elementami nawierzchni drogowej bieżnik opony ulega deformacji i penetruje wgłębienia nawierzchni próbując odwzorować jej kształt [64, 66]. Zjawisko otulania jest skomplikowane, a w literaturze opisywane od lat 60. ubiegłego wieku.

Gough [65, 69, 70, 71] sprawdził zachowanie opon na przeszkodzie o wielkości mniejszej niż powierzchnia styku nawierzchni z oponą (Rys. 18a). Kontakt opony z przeszkodą następuje zanim środek koła znajdzie się na wysokości przeszkody; analogicznie, po przejechaniu środka koła przez przeszkodę nadal występują interakcje opony z przeszkodą. Z tych względów należy wyróżnić dwie powierzchnie styku opony z nawierzchnią (Rys. 18a). Podczas przejeżdżania koła przez przeszkodę Gough wykazał, że zmiany ulegają:

- siła pionowa,
- siła wzdłużna,
- prędkość kąтова koła (Rys. 18b).

Czas trwania tych odpowiedzi jest znacznie dłuższy niż czas potrzebny do przekroczenia przeszkody, co wynika z właściwości lepko-elastycznych i geometrii opony [65, 69, 70, 71, 83].

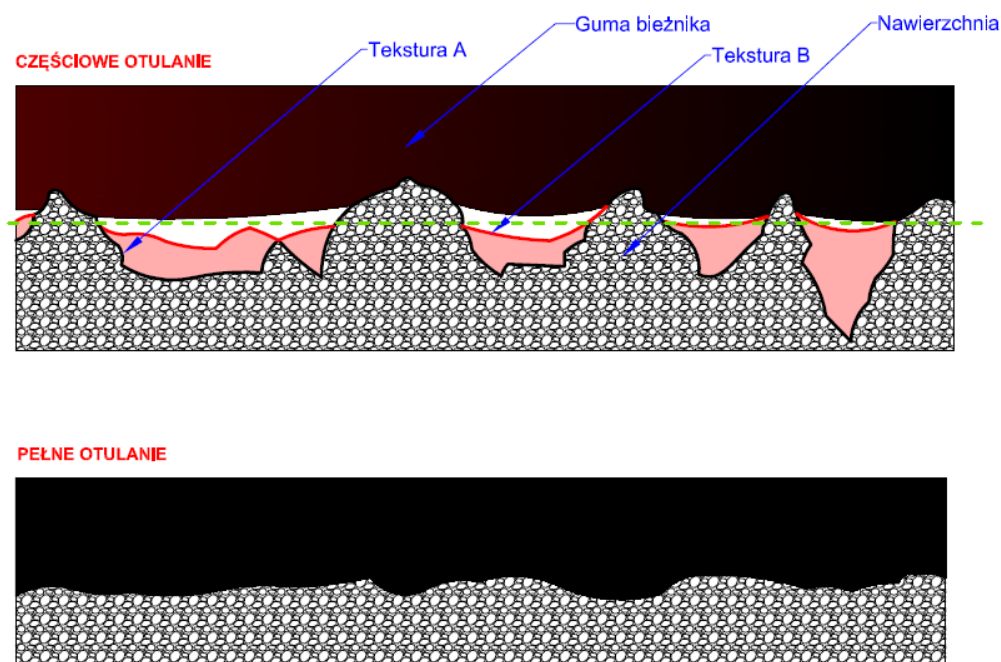


Rys. 18 Zachowanie opon na przeszkodzie o wielkości mniejszej niż powierzchnia styku nawierzchni z oponą: a) przejazd opony przez przeszkodę, b) zmiany siły pionowej, wzdłużnej oraz prędkości wirowania koła [65].

Lippmann [72] badając odpowiedź opon samochodowych na kilku stopniowych przeszkodach o różnych wysokościach wykazał, że istnieje liniowa zależność pomiędzy zmianami siły wzdłużnej i pionowej opony a wysokością przeszkody. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponował, że do obliczeń reakcji opony na nierówność przeszkody należy wykorzystać sumę nierówności wysokości, niezależnie od ich kształtu.

Kontakt między gumą bieżnika a nawierzchnią może być dwojaki; możliwe jest uzyskanie pełnego kontaktu między gumą bieżnika a zewnętrzną powierzchnią nawierzchni drogowej, jednak w większości przypadków kontakt między bieżnikiem opony a nawierzchnią jest tylko częściowy (Rys. 19) [64, 66, 84, 85]. Bieżnik opony jest dociskany oraz odchylany przez nierówności nawierzchni. Przy dużej sztywności gumy i opasania opony, nie zagłębia się ona całkowicie we wgłębienia w teksturze nawierzchni, tworząc swego rodzaju mostki pomiędzy wierzchołkami sąsiednich nierówności tekstury. W obszarze styku opona-nawierzchnia tworzą się wówczas kieszenie i kanały powietrzne.

Pomimo zachowania jednakowego ugięcia opony na nawierzchniach o różniących się teksturach A (czarna linia) i B (czerwona linia) (Rys. 19) należy zauważyć znaczącą różnicę w ich wartości MPD [64]. Choć MPD pozwala w łatwy sposób scharakteryzować teksturę nawierzchni, to nie uwzględnia współpracy opony z nawierzchnią. Niezbędne wydaje się zatem znalezienie wskaźnika liczbowego opisującego nawierzchnię, który uwzględniałby zjawisko otulania. Parametr taki pozwalałby dokładniej określać opór toczenia niż wskaźnik MPD. Rozwiązaniem wydaje się określenie głębokości, na której zachodzi jeszcze interakcja elementów bieżnika opony z nawierzchnią. Taką wysokość nierówności można potraktować jako minimum, poniżej którego nie będzie już prowadzona analiza geometryczna elementów nawierzchni ani ich oddziaływań z bieżnikiem opony. Na Rys. 19 zaznaczono ją zieloną, przerywaną linią.



Rys. 19 Współpraca gumy bieżnika opony z nawierzchnią. Rysunek na górze przedstawia częściowe otulanie elementów nawierzchni przez gumę bieżnika, natomiast dolny pełne [64].

12. STANOWISKO DO POMIARU SZTYWNOŚCI DYNAMICZNEJ W WARUNKACH PENETRACJI BIEŻNIKA PRZEZ ELEMENTY TEKSTURY NAWIERZCHNI

Mając na uwadze poszukiwanie parametru, który będzie lepiej opisywał teksturę nawierzchni w kontekście oporu toczenia niż dotychczas stosowany parametr MPD, podjęto próbę analizy sztywności bieżnika opony. W ramach prowadzonych eksperymentów poddano analizie głębokość oraz szybkość wnikania elementów nierówności nawierzchni w oponę. Kolejnym ważnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę jest wielkość siły wymuszającej zagłębienie się elementów tekstury w oponę. Powyższe eksperymenty powinny być prowadzone w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. W tym celu zbudowano stanowisko do pomiaru sztywności dynamicznej bieżnika opon. Sztywność dynamiczną oceniano poprzez wciskanie odpowiednio ukształtowanych penetratorów w bieżnik opony. Kształt powierzchni czołowej penetratorów odpowiadał geometrycznie elementom tekstury nawierzchni wzorcowej lub nawierzchni rzeczywistej.

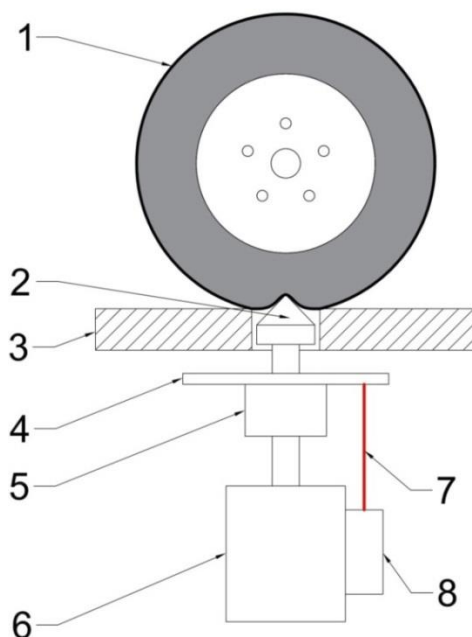
12.1. Budowa stanowiska

Urządzenie do pomiaru sztywności dynamicznej bieżnika opony zbudowano w oparciu o siłownik pneumatyczny, który wywiera siłę na penetrator. Wielkość siły użytej do wciskania penetratora w bieżnik jest mierzona za pomocą odpowiedniego przetwornika. Głębokość penetracji jest wyznaczana przy pomocy laserowego czujnika przemieszczenia. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na Rys. 20. Natomiast kompletny system pomiarowy został przedstawiony na Rys. 21, w którego skład wchodzi:

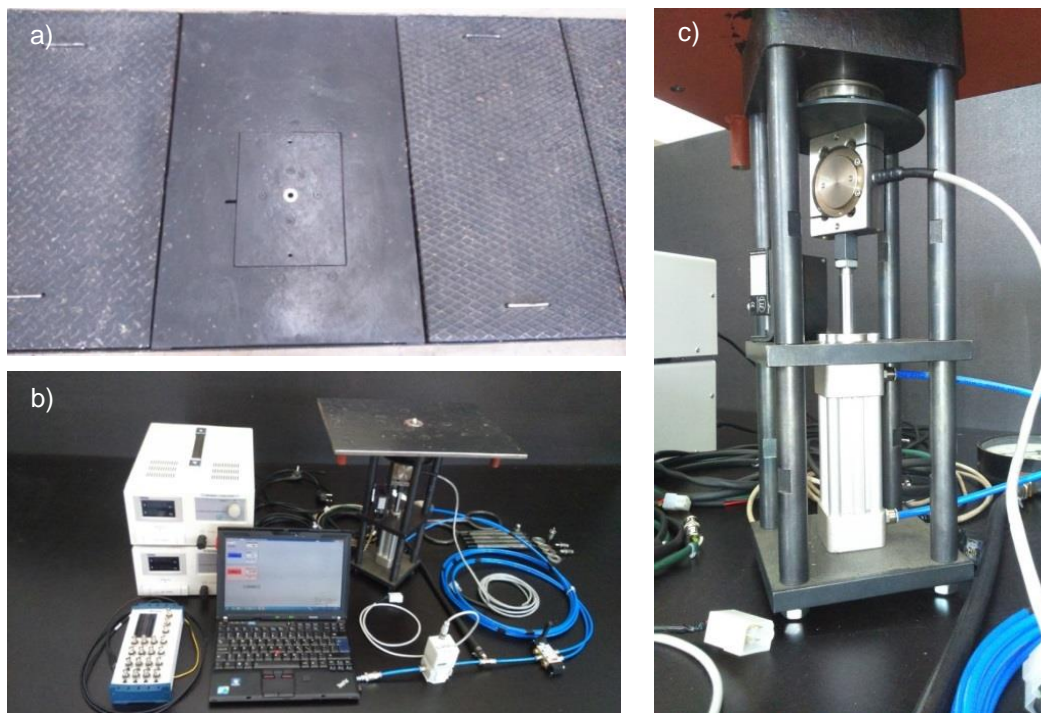
- a) rama stanowiska,
- b) kieszeń z zamocowanymi elementami wykonawczymi i pomiarowymi,
- c) laserowy czujnik przemieszczenia,
- d) siłownik pneumatyczny,
- e) przetwornik siły,
- f) przewody pneumatyczne,
- g) przewody sygnałowe,
- h) kasetę pomiarową,
- i) zasilacze,
- j) komputer z programem,
- k) regulator ciśnienia
- l) manometr,
- m) zestaw penetratorów z podkładkami dystansowymi,
- n) prowadnica z łożyskiem liniowym,
- o) zawór powietrza.

Penetrator połączono z prowadnicą poruszającą się w łożysku liniowym. Ruch penetratora jest wymuszany siłownikiem pneumatycznym. Penetratory mogą być wciskane w oponę za pomocą

siłownika, który może być zasilany maksymalnym ciśnieniem wynoszącym 250 kPa. Ciśnienie pneumatyczne podawane jest do siłownika za pomocą regulatora ciśnienia. Jego wartość zadawana jest poprzez program sterujący stanowiskiem pomiarowym.

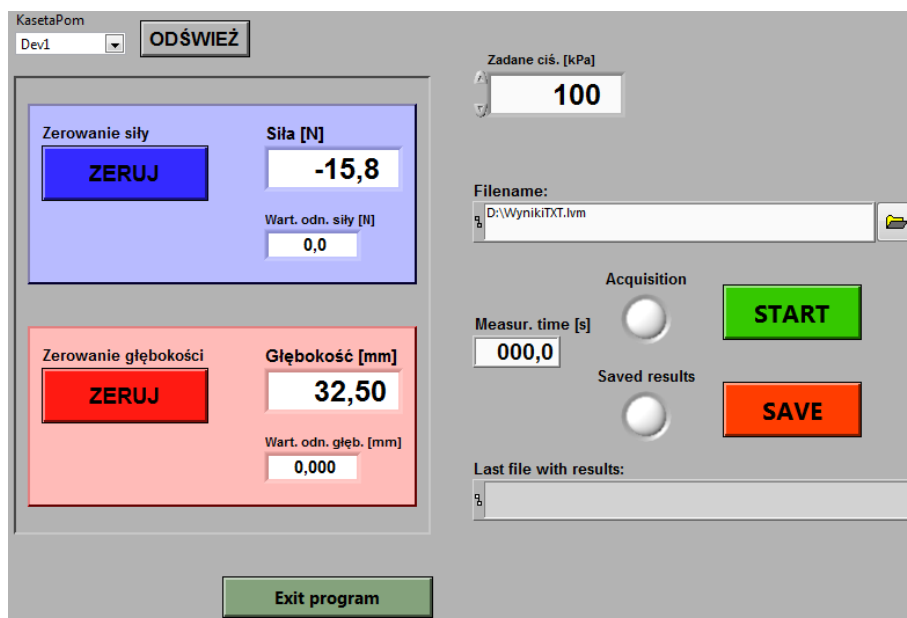


Rys. 20 Schemat ustroju pomiarowego do wyznaczania sztywności dynamicznej bieżnika opony. 1. Opona, 2. Penetrator, 3. Płyta najazdowa, 4. Powierzchnia odniesienia, 5. Czujnik pomiaru siły, 6. Siłownik pneumatyczny, 7. Wiązka lasera, 8. Czujnik laserowy do pomiaru przemieszczenia. Rysunek poglądowy, nie jest zachowana proporcja wymiarowa.



Rys. 21 Stanowisko do pomiaru sztywności dynamicznej bieżnika opony: a) płyta najazdowa z umieszczonym układem pomiarowym, b) kompletny układ pomiarowy wraz z elementami sterującymi, c) ustrój pomiarowy z zamontowaną płytą najazdową.

Do zarządzania systemem pomiarowym powyższego stanowiska opracowano program do rejestracji sygnałów. Program napisano w graficznym środowisku programistycznym LabVIEW. Umożliwia on rejestrowanie wielkości siły i przemieszczenia penetratora w funkcji czasu z szybkością 1000 próbek na sekundę. W programie wbudowano funkcje umożliwiające ustawianie ciśnienia w siłowniku pneumatycznym oraz kalibrację czujnika siły i przemieszczenia. Interfejs graficzny programu pomiarowego przedstawiono na Rys. 22.



Rys. 22 Interfejs graficzny programu pomiarowego.

12.2. Metodyka badawcza

W celu pomiaru sztywności dynamicznej bieżnika należy oponę badawczą ustawić w taki sposób, żeby środek powierzchni styku opony z nawierzchnią pokrywał się ze środkiem penetratora. Do badań sztywności dynamicznej zastosowano opony typu Vredestein Slick o rozmiarze 235/45R17 94W i o różnej twardości (Rys. 23). Kolejnym krokiem jest sprawdzenie kalibracji czujnika siły oraz przemieszczenia. Następnie należy ustawić ciśnienie regulatora pneumatycznego. To ciśnienie bezpośrednio wiąże się z wielkością siły wymuszającej wciskanie penetratora w bieżnik opony. Po rozpoczęciu pomiaru uruchamiany jest siłownik pneumatyczny z jednoczesną rejestracją wielkości siły i przemieszczenia w funkcji czasu.

Zmierzone wartości zagłębienia oraz siły umożliwiają stworzenie zależności przedstawiających dynamikę zjawisk zachodzących pomiędzy oponą a penetratorem, który odwzorowuje elementy tekstury wciskane w bieżnik.



Rys. 23 Koło badane umieszczone na płycie stanowiska pomiarowego.

12.3. Penetratory do badania sztywności dynamicznej bieżnika opony

Do badań sztywności dynamicznej bieżnika opony użyto dwóch grup penetratorów. W pierwszej grupie znalazły się penetratory odwzorowujące nierówności o prostych, geometrycznych kształtach (Rys. 24), natomiast w drugiej grupie znalazły się penetratory odwzorowujące rzeczywiste nawierzchnie (Rys. 25). Elementy regularnej tekstury nawierzchni ograniczono do dwóch kształtów: wypukłej sfery i wypukłego ostrosłupa. Dla penetratorów z wypukłą sferą przewidziano cztery średnice: 6, 8, 12 oraz 16 mm. Natomiast dla wypukłych ostrosłupów o podstawie kwadratu o wymiarach 16 x 16 mm przewidziano dwie wysokości: 4 i 9 mm.



Rys. 24 Penetratory o regularnych kształtach: a) z wypukłymi sferami o średnicy kolejno od lewej- 6, 8, 12 oraz 16 mm, b) o kształcie wypukłego ostrosłupa o podstawie kwadratu 16 x 16 mm i wysokościach kolejno od lewej- 4 i 9 mm.

Penetratory odzwierciedlające rzeczywiste nawierzchnie zostały opracowane w taki sposób, aby podstawa nawierzchni miała wymiary 3 x 3 cm. Ograniczenie powierzchni podstawy do 9 cm² wynikało z maksymalnej dostępnej siły wciskania penetratora w bieżnik opony. Starano zachować się stosunek siły do powierzchni odzwierciedlający rzeczywiste warunki zachodzące w śladzie styku opony z nawierzchnią.



Rys. 25 Penetratory odpowiadające rzeczywistym nawierzchniom: a) APS4, b) SMA8, c) SMA11, d) na górze- nawierzchnia poroelastyczna PERS, na dole- sztywna replika nawierzchni PERS.

12.4. Pomiary sztywności dynamicznej opony z zastosowaniem penetratorów o różnej geometrii

W badaniach sztywności dynamicznej bieżnika opony zamierzano odwzorować rzeczywiste oddziaływanie nawierzchni na oponę podczas ruchu pojazdu z prędkością 20 m/s (72 km/h). Ustalono, że długość śladu opony na nawierzchni wynosi około 20 cm, a kontakt opony z nawierzchnią podczas ruchu pojazdu trwa około 10 ms. Założono, że średnie ciśnienie między oponą a nawierzchnią wynosi 210 kPa. Mając powyższe na uwadze przyjęto następujące warunki prowadzenia badań: temperatura otoczenia wynosiła 25°C. Ciśnienie pompowania opony przyjmowało trzy wartości: 150, 210 i 270 kPa.

Pole przekroju poprzecznego dla penetratorów z wypukłą sferą obliczano z zależności:

$$P_{pp} = \pi \cdot r^2 \quad (10)$$

gdzie: P_{pp} - pole przekroju poprzecznego penetratora z wypukłą sferą, r - promień penetratora.

Siłę, z jaką penetrator będzie wpychany w oponę, obliczono z zależności:

$$F = p_k \cdot P_{pp} \quad (11)$$

gdzie: F - siła z jaką penetrator będzie wpychany w oponę, p_k – ciśnienie w oponie.

Ciśnienie powietrza, które musi zostać dostarczone do siłownika o średnicy tłoczyska 32 mm, żeby wytworzyć siłę potrzebną do wepchnięcia penetratora w oponę, obliczano z zależności:

$$p_{sil} = F/P_{tt} \quad (12)$$

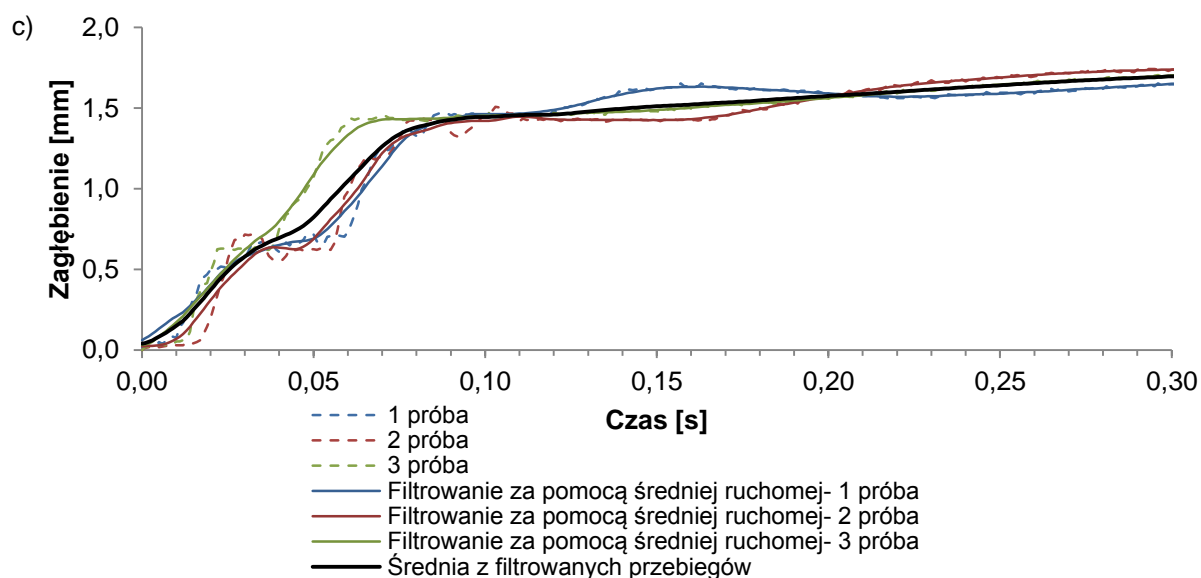
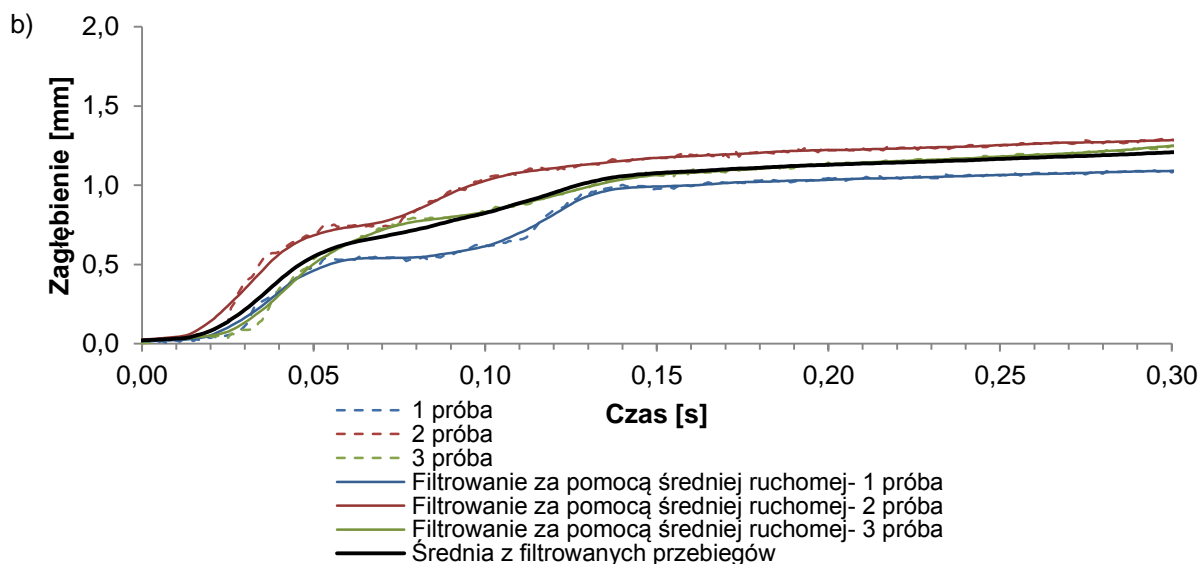
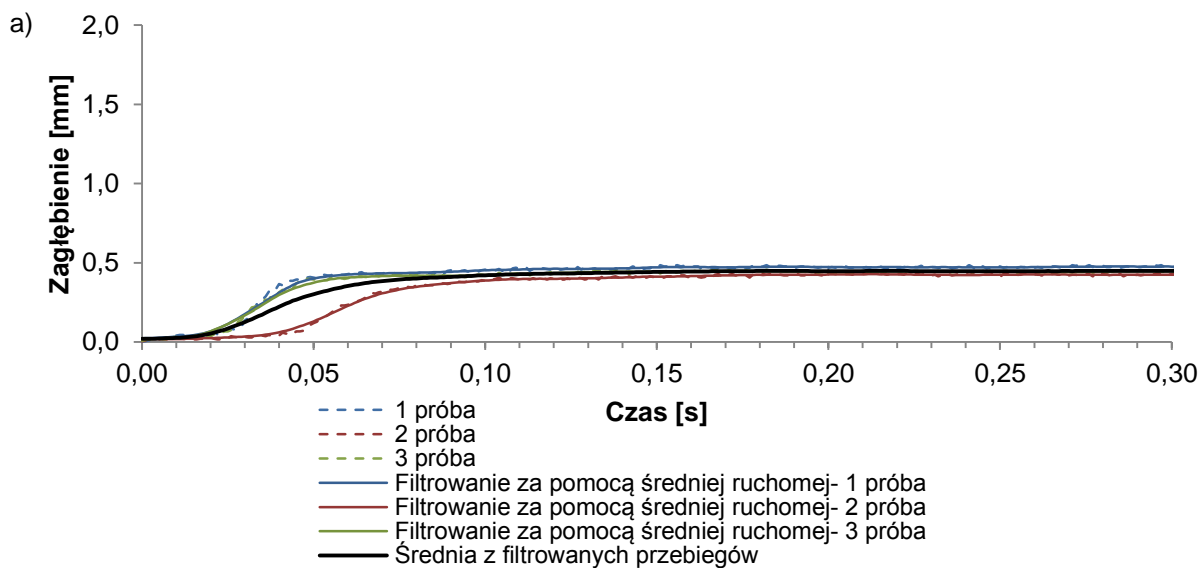
gdzie: p_{sil} - ciśnienie dostarczane do siłownika, P_{tt} - pole przekroju poprzecznego tłoczyska.

Wyniki pomiarów rejestrowano z częstotliwością 1000 Hz. Następnie rezultaty filtrowano przy wykorzystaniu średniej ruchomej z 25 pomiarów.

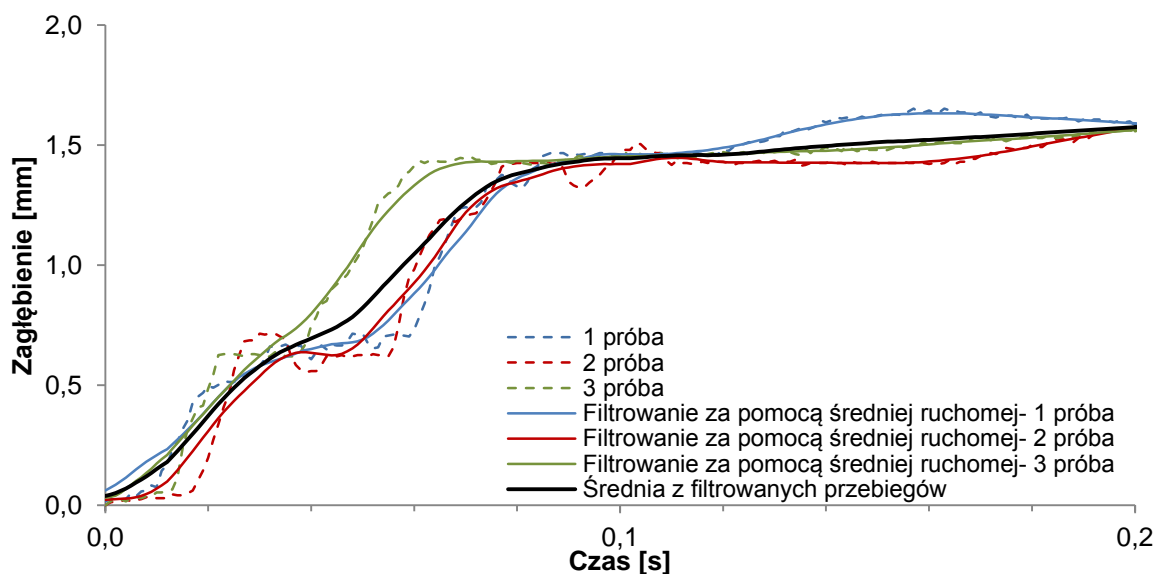
12.5. Wpływ ciśnienia na szybkość penetracji i zagłębienie penetratora w oponę na przykładzie wypukłej sfery o średnicy 8 mm

W celu zbadania wpływu ciśnienia na szybkość penetracji i zagłębienie penetratora w bieżnik opony, wykonano badania przy ciśnieniu powietrza dostarczanego do siłownika wynoszącym 50 kPa, 150 kPa i 250 kPa. Tym ciśnieniom odpowiadają następujące wartości sił: 40 N, 121 N oraz 201 N (Rys. 26). Badania wykonano z użyciem penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm dla suchej i czystej powierzchni opony. W celu sprawdzenia powtarzalności pomiarów wykonano po 3 próby każdego eksperymentu. Każdą próbę wykonywano w różnych punktach bieżnika rozłożonych na obwodzie opony co około 90°. Uzyskany przebieg funkcji przefiltrowano przy użyciu średniej ruchomej. Tak uzyskane wyniki z 3 prób uśredniano. Na Rys. 27 przedstawiono wpływ działania średniej ruchomej oraz efekt uśrednienia trzech przebiegów.

Analizując zależności przedstawione na powyższych rysunkach należy zauważyć, że powtarzalność wyników uzyskiwanych z poszczególnych prób pomiarowych nie jest zadowalająca. Szczególnie jest to widoczne podczas analizy pierwszych 0,2 s prowadzonego eksperymentu, co zostało uwidocznione na przykładzie przedstawionym na Rys. 27. Dlatego też zdecydowano, aby pomiary prowadzić dla min. 3 prób (przy większej liczbie prób skrajne rezultaty były odrzucane). W dalszym kroku próby były odpowiednio filtrowane i uśrednianie. Do dalszych analiz będą używane już tylko przebiegi uśrednione.



Rys. 26 Rezultaty uzyskane w wyniku badania przy użyciu penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm. Ciśnienie pompowania opony wynosiło 210 kPa. Siły wymuszające wynosiły: a) 40 N, b) 121 N, c) 201 N.



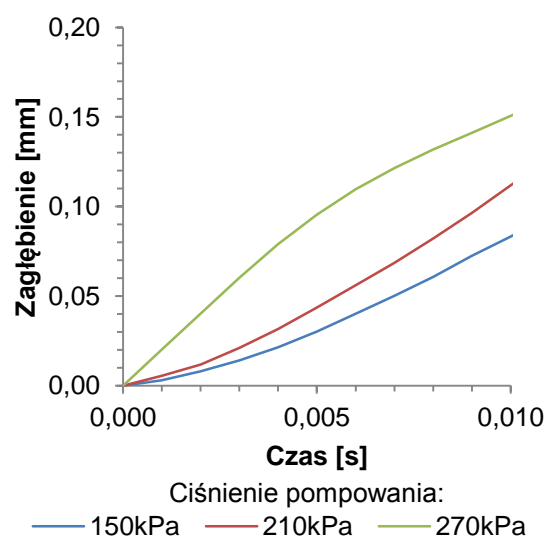
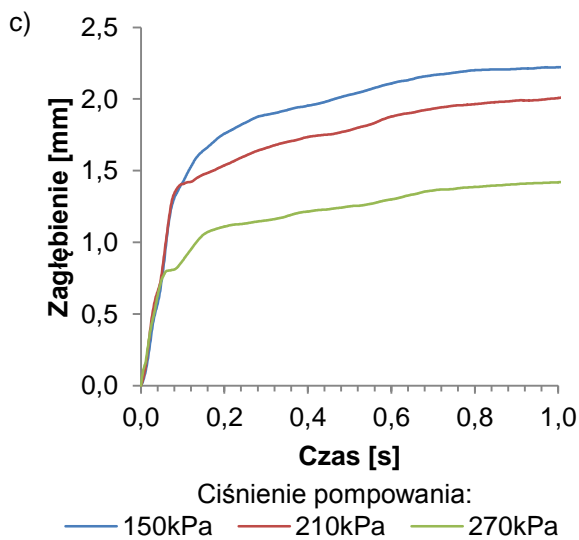
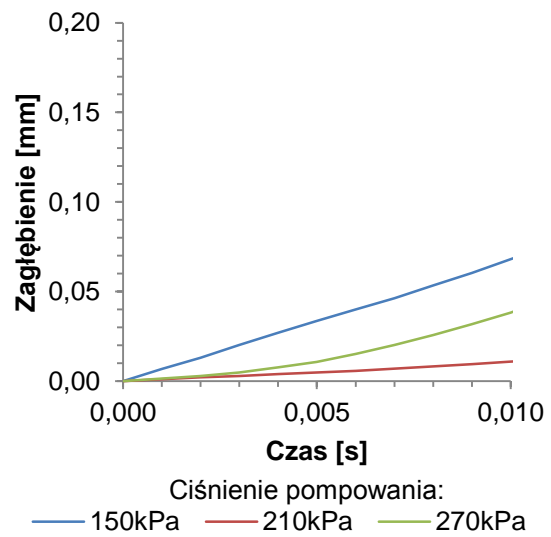
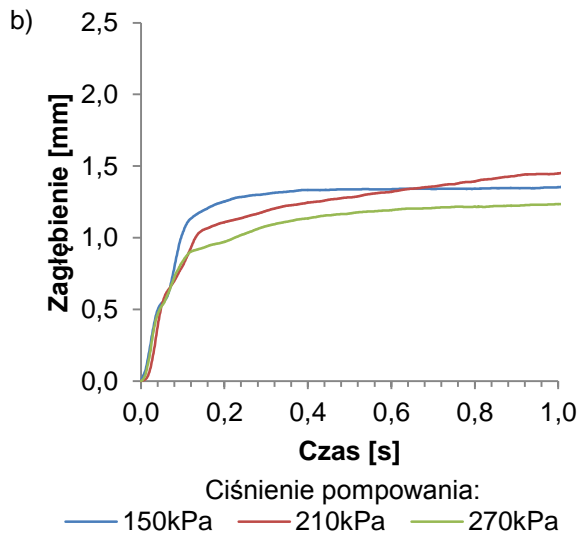
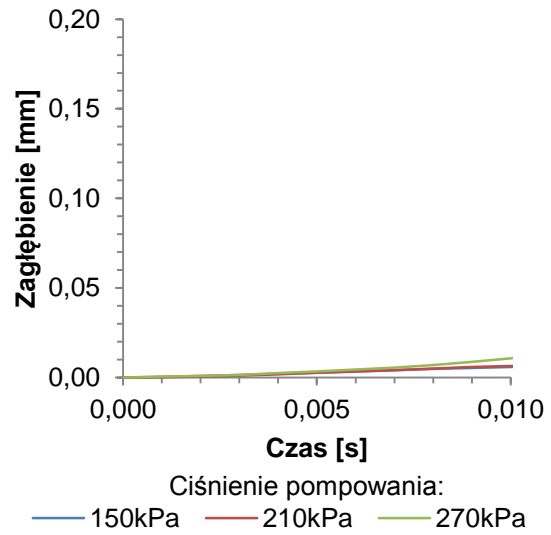
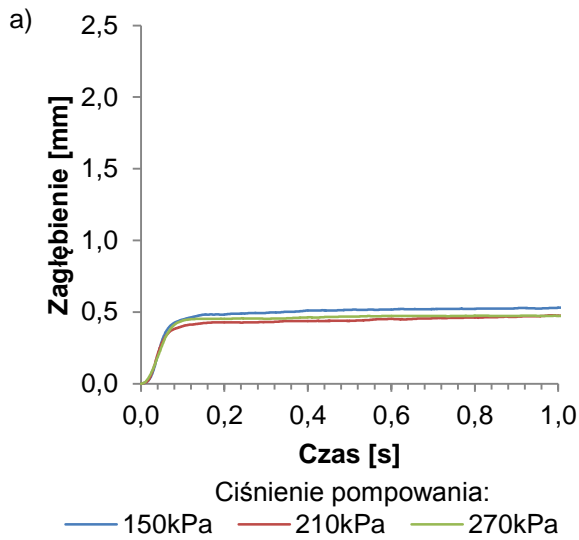
Rys. 27 Powiększony fragment przebiegu zależności przedstawionej na Rys. 26c.

Zgodnie z oczekiwaniami uzyskane rezultaty potwierdziły to, że przy większej sile wymuszenia uzyskiwano większe wartości zagłębienia i krótsze czasy penetracji. W przypadku siły wymuszającej wynoszącej 40 N uzyskano zagłębienie wynoszące około 0,5 mm w czasie 0,08 s. Dalszy przyrost zagłębienia jest niezauważalny. Analizując uzyskane rezultaty dla siły wymuszającej wynoszącej 121 N można stwierdzić, że przyrost zagłębienia penetratora jest dwuetapowy. W pierwszym etapie uzyskano zagłębienie wynoszące około 1 mm w czasie wynoszącym 0,13 s. W drugim etapie zagłębienie powiększyło się do około 1,3 mm dla czasu, który osiągnął wartość 0,3 s. Etapowość zagłębienia się penetratora w oponę jest prawdopodobnie związana ze specyficznymi właściwościami gumy, z której zbudowany jest bieżnik. Dla ostatniej siły wymuszającej wynoszącej 201 N zauważono podobną etapowość zagłębienia się penetratora jak w przypadku poprzedniej siły. W tym przypadku w ciągu 0,08 s uzyskano głębokość penetracji wynoszącą 1,4 mm. W drugim etapie, gdzie zagłębienie postępuje znacznie wolniej, po osiągnięciu czasu wynoszącego około 0,3 s, uzyskano wartość zagłębienia wynoszącą około 1,7 mm. Pierwszy etap, gdzie gwałtownie przyrasta zagłębienie penetratora przypuszczalnie jest związany z wysokoczęstotliwościową histerezą gumy. Natomiast drugi etap, gdzie przyrost zagłębienia penetracji następuje znacznie wolniej, prawdopodobnie jest związany z niskoczęstotliwościową histerezą gumy. Niezależnie od wartości siły wymuszającej, z reguły w pierwszym etapie, można zauważyć skokowy przyrost zagłębienia. Prawdopodobnie wynika to z tego, że przemieszczanie się gumy względem powierzchni penetratora ma właśnie taki charakter (stick-slip). Natomiast w drugim etapie przyrostu zagłębienia penetratora nie obserwuje się zmian skokowych. Zmiany te są płynne i rozłożone w czasie.

12.6. Wpływ ciśnienia pompowania opony na szybkość penetracji i zagłębienie w oponę na przykładzie penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm

W celu sprawdzenia wpływu ciśnienia pompowania ogumienia na zagłębienie penetratora wykonano pomiary penetracji dla 3 ciśnień wynoszących: 150 kPa, 210 kPa i 270 kPa. Badania przeprowadzono dla 3 różnych sił wymuszających: 40 N, 121 N oraz 201 N. W wyniku tego uzyskano zależności, które przedstawiono na Rys. 28. Każda uzyskana zależność jest średnią z 3 powtórzeń, które wcześniej zostały odpowiednio przefiltrowane. Badania wykonano z użyciem penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm. Powierzchnia penetratora oraz opony była czysta oraz sucha.

Na podstawie powyższych zależności można zaobserwować tendencję zmniejszania się głębokości penetracji wraz ze wzrostem ciśnienia pompowania ogumienia. Ta zależność powtarza się dla wszystkich 3 sił wymuszających penetrację. Przy zwiększaniu ciśnienia pompowania wzrasta sztywność czoła bieżnika. Skutkuje to tym, że penetrator zagłębia się mniej w oponę. Na głębokość zanurzenia penetratora w bieżnik opony wpływają 2 czynniki. Pierwszy związany jest z zagłębianiem się penetratora w gumowy maszyn opony, a drugi czynnik związany jest z uginaniem się pasa bieżnika. Dlatego też zwiększając ciśnienie pompowania opony zmniejszany jest wpływ drugiego czynnika na penetrację. Powyższe zjawisko nasila się wraz ze wzrostem siły penetracji. Dla najmniejszej siły wymuszającej (40 N) wpływ ciśnienia pompowania opony na głębokość penetracji jest znikomy. Wiąże się to z tym, że przy tak niedużej sile wymuszającej penetrator zanurza się tylko w maszyn gumy bez uginania bieżnika. Przy zwiększaniu siły wymuszającej widać wyraźny wzrost wpływu ciśnienia pompowania na głębokość penetracji. Jest to związane z tym, że duże siły wymuszające, oprócz wbijania penetratora w gumę, jednocześnie są w stanie ugiąć dodatkowo pas bieżnika opony. Powyższe obserwacje dotyczą zjawisk, których czas trwania został ograniczony do 1 s. Jeżeli analizie poddanych zostanie pierwszych 10 ms, to zależność zagłębienia w funkcji ciśnienia pompowania nie jest powtarzalna. Trudno jest jednoznacznie wyjaśnić co jest tego powodem. Być może, przy tak krótkich czasach bezwładność penetratora jest zbyt duża. Inną przyczyną mogą być zbyt duże opory ruchu w łożysku liniowym penetratora czy tarcie wewnętrzne siłownika pneumatycznego. Analiza zjawiska penetracji ograniczona do 10 ms jest związana z czasem trwania kontaktu opony w śladzie styku z nawierzchnią przy założonej prędkości jazdy wynoszącej około 80 km/h oraz śladu styku opony z nawierzchnią o długości około 20 cm. Podsumowując, stwierdzono, że opracowane stanowisko nie nadaje się do prowadzenia analiz związanych z penetracją bieżnika w tak krótkim czasie, a dalsze analizy zmierzające do opracowania deskryptora nawierzchni prowadzone będą dla zjawisk trwających 1 s.



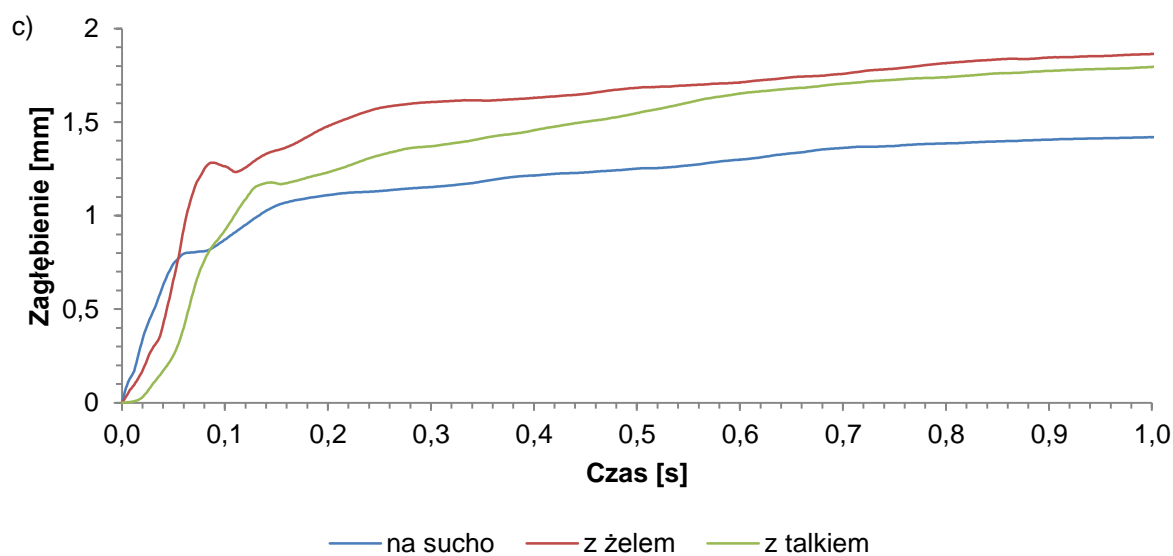
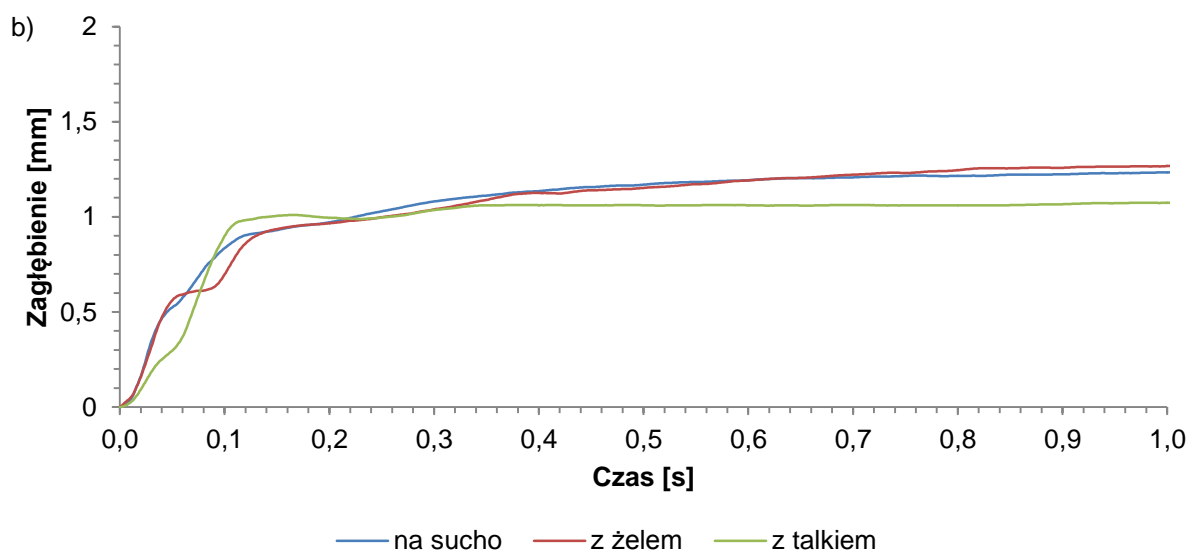
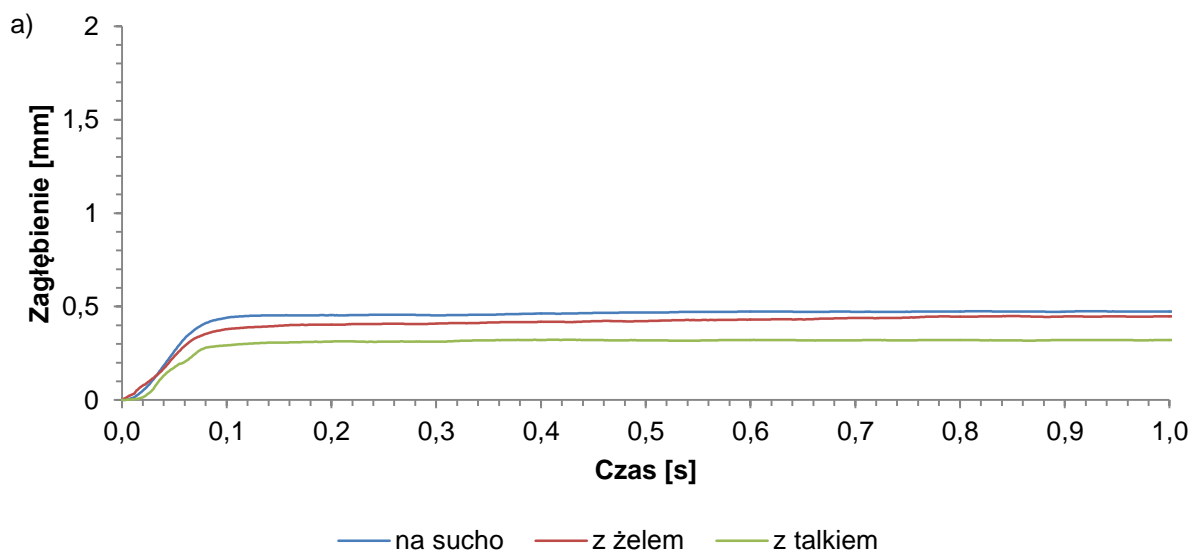
Rys. 28 Wpływ ciśnienia pompowania opony na szybkość zagłębienia się penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm. Siły wymuszające wynosiły: a) 40 N, b) 121 N, c) 201 N. Z prawej strony przedstawiono pierwsze 10 ms w formie powiększonej odpowiadające przebiegom prezentowanym na wykresach z lewej strony.

12.7. Wpływ zanieczyszczenia wprowadzonego pomiędzy oponę a penetrator na szybkość i wielkość zagłębienia w oponę

W celu sprawdzenia wpływu wprowadzonego zanieczyszczenia pomiędzy oponę a penetrator na szybkość i wielkość zagłębienia przeprowadzono badania z celowo wprowadzonym żelem do montażu opon lub talkiem pomiędzy penetrator a bieżnik opony. Przeprowadzono również badania porównawcze z suchą i czystą powierzchnią opony, jak i penetratora (na sucho). Eksperyment wykonano przy wykorzystaniu penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm. Pomiar wpływu zanieczyszczenia na głębokość penetracji wykonano dla 3 różnych sił wymuszających: 40 N, 121 N oraz 201 N, przy jednej, wybranej wartości ciśnienia pompowania opony, wynoszącej 270 kPa.

Na Rys. 29 przedstawiono wpływ wprowadzonego zanieczyszczenia pomiędzy oponę a penetrator na jego szybkość i głębokość zanurzania. Analizując poniższe zestawienia można zauważyć dwuetapowy przebieg zjawiska. Do około 0,1 s następuje szybki przyrost zagłębienia, niezależnie od wielkości siły wymuszającej. Następnie, w czasie od 0,1 s do 1 s przyrost zagłębienia przebiega znacznie wolniej i w mniejszym zakresie. Dla sił wymuszających wynoszących: 40 N i 121 N wpływ rodzaju zanieczyszczenia na szybkość i głębokość penetracji nie jest widoczny, jedynie talk nieznacznie wpływa na zmniejszenie głębokości penetracji. Zjawisko to jest trudne do wytłumaczenia, ponieważ właściwości talku powinny spowodować większą głębokość penetracji. Dla największej siły wymuszającej, o wartości 201 N, można jednoznacznie określić, że wprowadzenie środków zmniejszających tarcie zwiększa głębokość penetracji. Trudno jest natomiast wytłumaczyć, dlaczego w pierwszej fazie, trwającej od 0 s do 0,1 s, największą szybkość zanurzania osiągnął suchy penetrator.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że rodzaj wprowadzonego zanieczyszczenia ma wpływ na głębokość penetracji, nie zależy jednak jednoznacznie od wielkości sił wymuszających. Można również zauważyć niewielki wpływ wprowadzonego zanieczyszczenia na prędkość zanurzania się penetratora w oponę. Niemniej jednak trudno jest ustalić dlaczego najwyższe szybkości uzyskuje suchy penetrator, dlatego zrezygnowano z wprowadzania zanieczyszczenia w kolejnych eksperymentach badawczych.



Rys. 29 Wpływ zanieczyszczenia bieżnika na zagłębienie penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm. Ciśnienie pompowania 270 kPa. Siła wymuszająca penetrację: a) 40 N, b) 121 N, c) 201 N.

12.8. Analiza zagłębienia penetratora w oponę w funkcji siły wymuszającej

W celu przeprowadzenia analizy wielkości zagłębienia penetratora w oponę w funkcji siły wymuszającej przeprowadzono badania z wykorzystaniem większej liczby penetratorów o różnych kształtach. Penetratory podzielono na 2 grupy:

a) o regularnych kształtach: z wypukłą sferą o średnicy: 6, 8, 12 i 16 mm oraz o z wypukłym ostrosłupem o podstawie kwadratu 16 x 16 mm i wysokościach 4 oraz 9 mm (Rys. 30a),

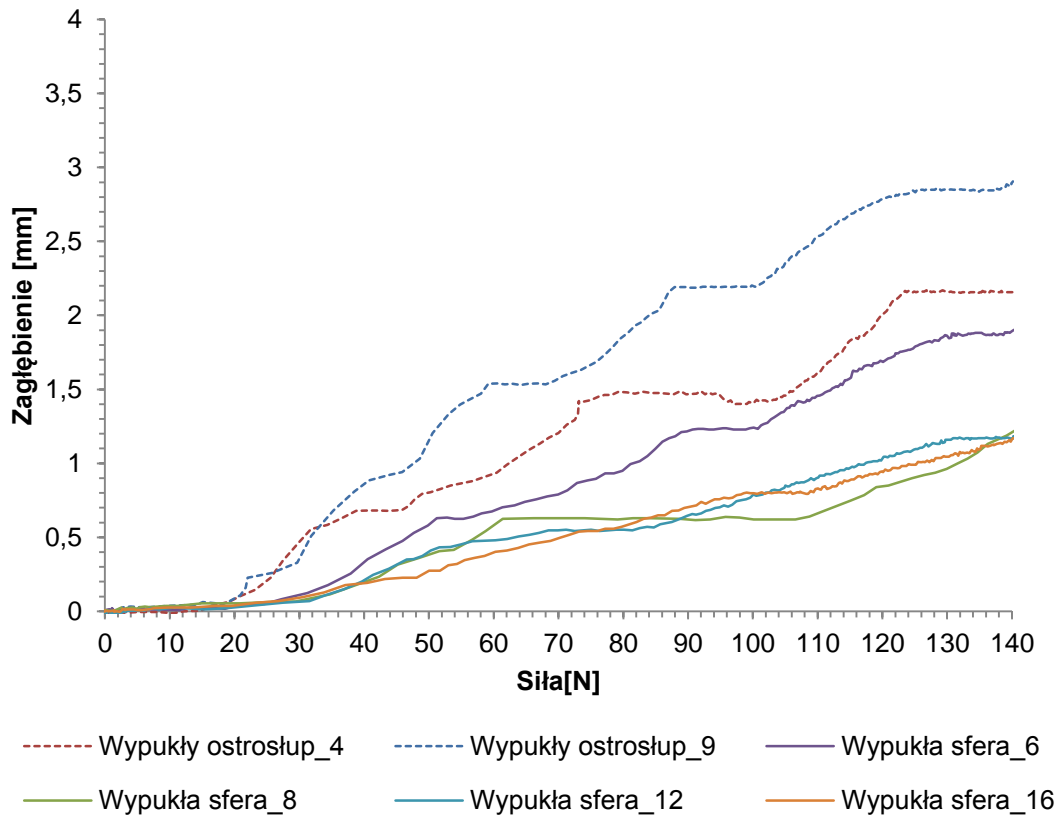
b) o nieregularnych kształtach tzn. na powierzchni czołowej penetratorów zostały naklejone fragmenty rzeczywistych nawierzchni badawczych (APS4, PERS, SMA11) oraz fragmenty replik nawierzchni PERS i SMA8 (Rys. 30b-d).

Do przeprowadzenia badań wykorzystano oponę typu slick producenta Vredestein. Ciśnienie pompowania w oponie wynosiło 210 kPa. Dla każdego penetratora wykonano 5 pomiarów w różnych miejscach na obwodzie opony. Jako wynik przyjmowano średnią z 3 najbardziej zbliżonych serii pomiarowych.



Rys. 30 Penetratory o regularnych kształtach oraz z fragmentami rzeczywistych nawierzchni: a) penetratory o kształcie wypukłej sfery o średnicy: od lewej 6, 8, 12 i 16 mm, następnie penetratory o kształcie wypukłego ostrosłupa o podstawie kwadratu 16 x 16 mm i wysokościach: 4 i 9 mm, b) penetratory z fragmentem nawierzchni PERS o tej samej teksturze, ale różnej sztywności; 2 pierwsze z lewej- sztywna replika nawierzchni poroelastycznej, 2 kolejne- fragment rzeczywistej, poroelastycznej nawierzchni, c) penetratory z fragmentem rzeczywistej nawierzchni: 2 pierwsze z lewej- replika SMA8, 2 następnie- SMA11, d) penetratory z fragmentem rzeczywistej nawierzchni APS4.

W pierwszym etapie przeprowadzono badania porównawcze z wykorzystaniem penetratorów o regularnych kształtach. Założono, że penetratory o kształcie wypukłych sfer będą odpowiadały nawierzchniom o łagodnej teksturze. Natomiast penetratory o wypukłym ostrosłupie będą odpowiadały nawierzchniom o agresywnej teksturze. Wyniki badań porównawczych penetratorów o regularnych kształtach zamieszczono na Rys. 31.

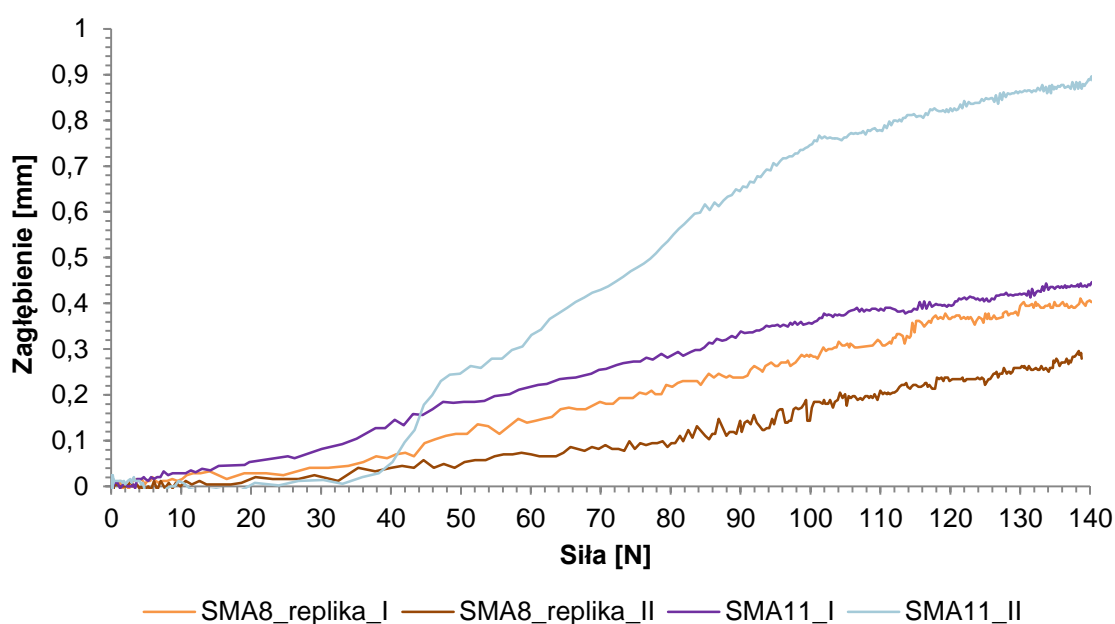


Rys. 31 Zestawienie zagłębienia penetratorów o regularnych kształtach w funkcji siły wymuszającej.

Analizując powyższe zestawienie można zauważyć, że dla stałej siły wymuszającej zagłębienie rośnie, gdy maleje kąt wierzchołkowy dla penetratorów o kształcie wypukłego ostrosłupa. W przypadku penetratorów z wypukłą sferą przy stałej sile wymuszającej jedynie penetrator o średnicy 6 mm zagłębia się bardziej niż pozostałe penetratory z wypukłą sferą. Należy zwrócić uwagę, że penetratory o średnicach 8 mm, 12 mm i 16 mm mają zbliżony przebieg zagłębiania się w funkcji siły wymuszającej. Ich głębokość penetracji wynosi około 1,2 mm dla siły wymuszającej o wartości 140 N. Prawdopodobnie w tym zakresie sił wymuszających nie tylko średnica penetratorów decyduje o wielkości zagłębienia. Czynnikiem wpływającym na wielkość zagłębienia jest także przyczepność gumy do powierzchni penetratora. Przy zwiększonej powierzchni styku penetratora z gumą, przy tej samej sile wymuszającej, maleją naciski jednostkowe. Guma posiada takie właściwości, że przy malejących naciskach jednostkowych jej przyczepność do podłoża zwiększa się. Na powierzchni kontaktu penetratora z gumą powstają siły styczne, których kierunki działania są ściśle związane z geometrią sfery wypukłej. Dla penetratorów o kształcie sfery wypukłej dla średnic począwszy od 8 mm o głębokości zanurzenia decydują przede wszystkim siły styczne i kierunki ich działania. Na tej podstawie penetratory o regularnych kształtach można podzielić na 2 grupy. Do pierwszej z nich można zaliczyć penetratory z wypukłymi ostrosłupami oraz wypukłą sferą o średnicy 6 mm. Tę grupę można przyporządkować nawierzchniom o agresywnej teksturze. Do drugiej grupy można zaliczyć penetratory z wypukłą sferą o średnicach: 8 mm, 12 mm i 16 mm. Tę grupę można przyporządkować

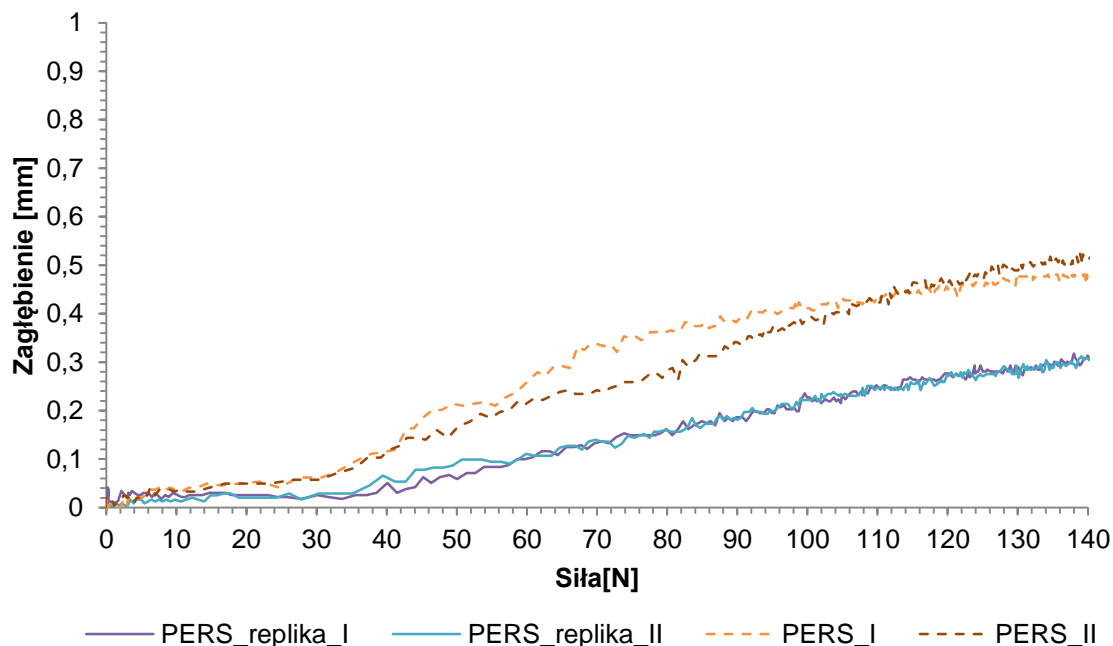
nawierzchniom o łagodnej teksturze. Obserwacje poczynione w tym eksperymencie wykorzystano do projektu nawierzchni referencyjnej omówionej w dalszej części pracy.

Na Rys. 32 przedstawiono przebieg zagłębienia penetratorów odpowiadających nawierzchniom SMA8 i SMA11 w funkcji siły wymuszającej. Każdą z tych nawierzchni reprezentowały 2 niezależne penetratory z naklejonymi próbkami nawierzchni. Dla 2 próbek nawierzchni SMA8 przebieg zagłębienia jest zbliżony, natomiast w przypadku SMA11 przebiegi te znacznie różnią się od siebie. Mając na uwadze wielkość zagłębienia dla siły wymuszającej 140 N, można zaliczyć te nawierzchnie do nawierzchni o łagodnej teksturze. Ich przebiegi zagłębienia korelują się z przebiegami penetratorów o wypukłej sferze dla średnic 8 mm, 12 mm oraz 16 mm. Ze względu na brak powtarzalności wyników eksperymentu dla nawierzchni SMA11 należy przypuszczać, że powierzchnia penetratora jest zbyt mała, aby dobrze odzwierciedlać rzeczywiste nawierzchnie.



Rys. 32 Zestawienie zagłębienia penetratorów z próbkami nawierzchni SMA8 i SMA11 w funkcji siły wymuszającej.

Celem kolejnego eksperymentu było zbadanie wpływu sztywności nawierzchni na głębokość penetracji bieżnika opony. Na potrzeby tych badań opracowano dwa penetratory pokryte nawierzchnią poroelastyczną typu PERS oraz kolejne dwa pokryte replikami tej nawierzchni. Nawierzchnia PERS jest nawierzchnią elastyczną, ponieważ w swojej strukturze zawiera granulę gumową. Repliki tej nawierzchni są identyczne co do geometrii, ale są dużo sztywniejsze, ponieważ są wykonane z żywicy epoksydowej. Wyniki przeprowadzonego eksperymentu zamieszczono na Rys. 33. Analizując uzyskane rezultaty można stwierdzić, że otrzymano dobrą powtarzalność pomiarów dla nawierzchni podatnej oraz sztywnej typu PERS. Zauważono również, że w całym zakresie sił wymuszających nawierzchnia poroelastyczna PERS pozornie bardziej zagłębiała się w oponę. Na całkowite przemieszczenie penetratora składa się jego częściowe zagłębienie w oponę oraz ugięcie samej nawierzchni poroelastycznej. Oznacza to, że do tego typu badań eksperymentalnych nie można używać nawierzchni elastycznych.



Rys. 33 Wpływ sztywności nawierzchni typu PERS na zagłębienie w oponę.

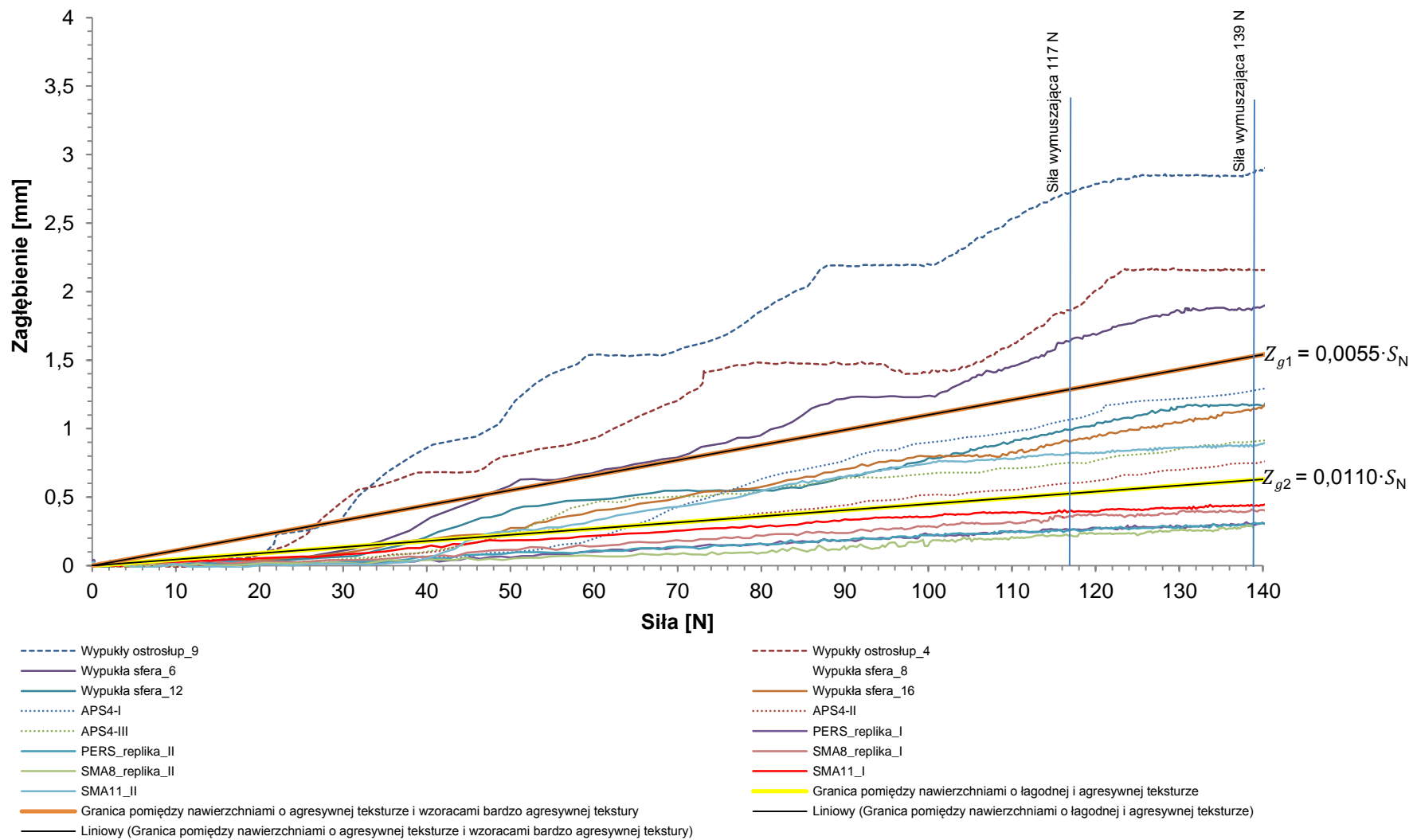
W celu przeprowadzenia analizy porównawczej penetratorów o regularnych kształtach oraz odzwierciedlających rzeczywiste nawierzchnie (z wyłączeniem nawierzchni podatnych) zestawiono na Rys. 34 ich zagłębienia w funkcji siły wymuszającej. Analizując szybkość zagłębienia się poszczególnych próbek tekstury nawierzchni można zauważyć, że przebiegi funkcji układają się w trzy grupy. Pomiędzy tymi grupami zostały arbitralnie umieszczone proste o równaniach:

$$Z_{g1} = 0,0055 \cdot S_N \quad (13)$$

$$Z_{g2} = 0,0110 \cdot S_N \quad (14)$$

gdzie: Z_g – zagłębienie próbki nawierzchni w oponę [mm], S_N – siła wymuszająca penetrację [N].

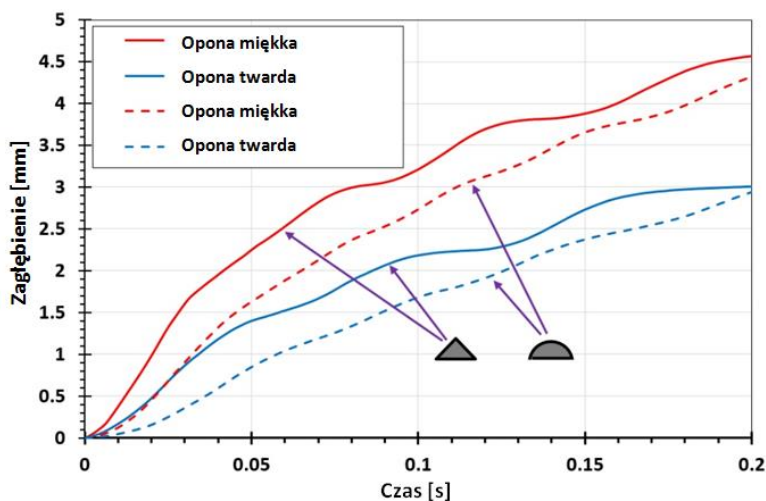
Prosta o współczynniku kierunkowym $a = 0,0055$ rozdziela nawierzchnie o łagodnej teksturze od nawierzchni o agresywnej teksturze. Natomiast prosta o współczynniku kierunkowym $a = 0,011$ rozdziela nawierzchnie o agresywnej teksturze od wzorców bardzo agresywnej tekstury. Do nawierzchni o łagodnej teksturze należą: Pers_replika_I, Pers_replika_II, SMA8_replika_I, SMA8_replika_II, SMA11_I. Następnie do grupy o agresywnej teksturze zawierają się: SMA11_II, APS4_I, APS4_II, APS4_III, Wypukła sfera_8, Wypukła sfera_12, Wypukła sfera_16. Ostatnia grupa składa się z: Wypukła sfera_6, Wypukły ostrosłup_4 oraz Wypukły ostrosłup_9. Podział próbek nawierzchni na grupy ze względu na agresywność tekstury ma na celu uproszczenie poszukiwania charakterystycznego parametru, który dobrze korelowałby współczynnikiem oporu toczenia. W tym zestawieniu próbka nawierzchni SMA11 została zaszeregowana do 2 różnych grup, ze względu na niewystarczającą reprezentację nawierzchni na niewielkiej powierzchni penetratora, jak wcześniej wyjaśniono (Rys. 32).



Rys. 34 Zestawienie zagłębienia w funkcji siły wymuszającej dla nawierzchni o różnym stopniu agresywności tekstury.

12.9. Analiza wpływu twardości mieszanki gumowej bieżnika na zagłębienie penetratora w oponę

W celu przeprowadzenia analizy wpływu twardości mieszanki gumowej na zagłębienie penetratora w bieżnik wybrano dwie opony o takim samym rozmiarze, ale znacząco różniące się twardości mieszanki gumowej bieżnika. Były to opony sportowe, przeznaczone do wyścigów górskich. Bieżnik pierwszej z nich miał twardość 68°Sh a drugiej 44°Sh w temperaturze 25°C. Ciśnienie w kole wynosiło 210 kPa, a siła wymuszająca 643 N. Do eksperymentu wykorzystano dwa penetratory o regularnych kształtach: Wypukły ostrosłup_4 - reprezentuje kruszywo o ostrych krawędziach, Wypukła sfera_12 – reprezentuje kruszywo o łagodnych krawędziach. Uzyskane wyniki zestawiono na Rys. 35. Z uwagi na to, że obydwa penetratory reprezentują agresywną teksturę użyto dużo większej siły wymuszającej niż używana była dotychczas. Wiąże się to z tym, że przy agresywnej teksturze naciski jednostkowe między oponą a wierzchołkami nierówności są znacznie większe.



Rys. 35 Zagłębienie 2 różnych penetratorów w bieżnik opon o różnych twardościach mieszanki gumowej.

Analizując powyższe zestawienie można zauważyć, że głębokość i szybkość zanurzania się penetratora jest ściśle związana zarówno z twardością mieszanki gumowej bieżnika, jak i kształtem powierzchni czołowej wciskanego elementu w oponę. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że deskryptor opisujący teksturę nawierzchni powinien uwzględniać zarówno rodzaj, jak i kształt użytego kruszywa.

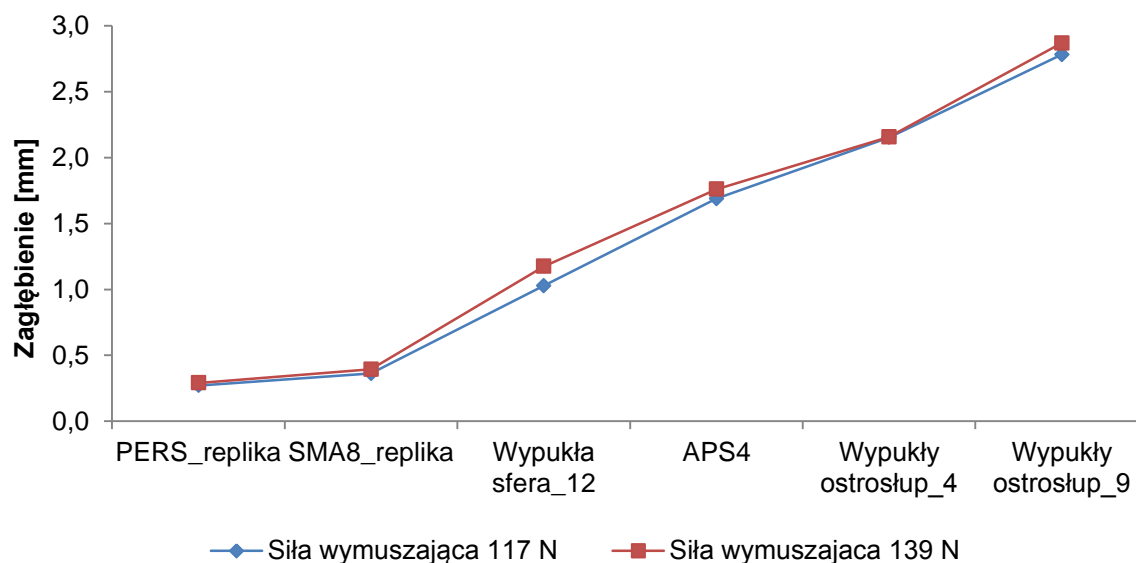
12.10. Poszukiwanie deskryptora nawierzchni w oparciu o głębokość penetracji bieżnika opony

W celu uproszczenia analiz parametrów związanych z penetracją bieżnika opony ograniczono liczbę penetratorów. Utworzono grupę 6 penetratorów, które reprezentują nawierzchnie o teksturze łagodnej, agresywnej i bardzo agresywnej. Znalazły się w niej: PERS_replika, SMA8_replika, Wypukła sfera_12, APS4, Wypukły ostrosłup_4, Wypukły ostrosłup_9. W pierwszym etapie wzięto pod uwagę wielkość zagłębienia penetratorów dla siły wymuszającej 117 N i 139 N (Rys. 34). Uzyskane rezultaty

przedstawiono w Tab. 6. Dwie siły wymuszające zostały wybrane w celu sprawdzenia ich wpływu na przebieg zmienności zagłębienia penetratorów w zależności do rodzaju tekstury (Rys. 36). Wykazano, że wielkość siły wymuszającej nie wpływa znacząco na charakter przebiegu zagłębienia penetratorów, dlatego do dalszych analiz będzie używana jedna siła wymuszająca o wartości 117 N. Zgodnie z oczekiwaniami wielkość zagłębienia zwiększa się wraz ze wzrostem agresywności tekstury.

Tab. 6 Zestawienie zagłębień dla wybranych penetratorów dla siły wymuszającej 117 N i 139 N.

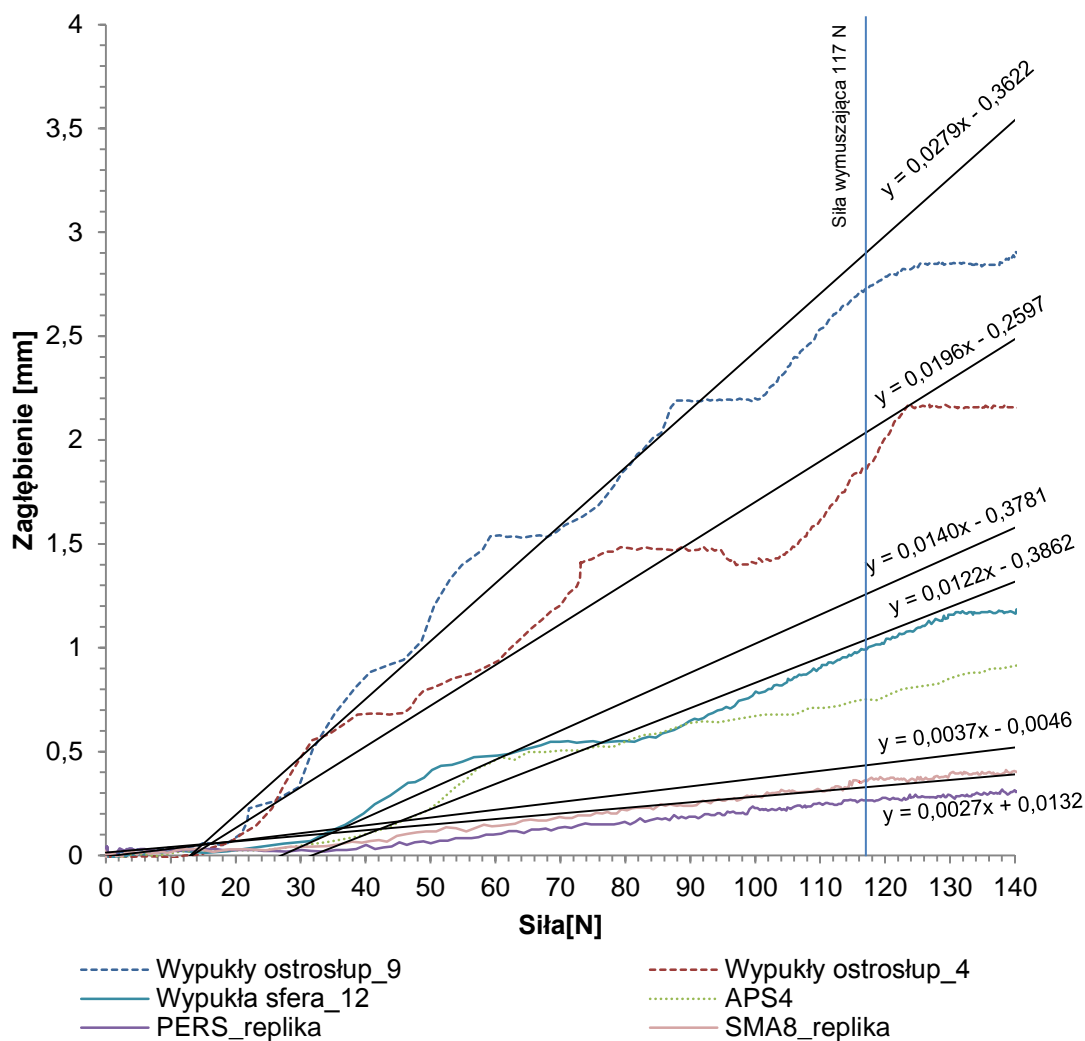
Zagłębienie [mm]						
Siła [N]	Nawierzchnia					
	PERS_replika	SMA8_replika	Wypukła sfera_12	APS4	Wypukły ostrosłup_4	Wypukły ostrosłup_9
117	0,271	0,362	1,027	1,689	2,154	2,782
139	0,290	0,394	1,175	1,760	2,158	2,869



Rys. 36 Przebieg zagłębienia penetratorów w oponę dla 2 różnych sił wymuszających.

Na Rys. 37 przedstawiono przebieg zagłębienia penetratorów w oponę w funkcji siły wymuszającej dla sześciu wybranych nawierzchni. Jako parametry potencjalnie opisujące teksturę nawierzchni wybrano: współczynnik kierunkowy trendu liniowego (a), pole powierzchni pod funkcją (P_p), zagłębienie dla siły wymuszającej 117 N (Z) (Rys. 37). Pole powierzchni (P_p) jest to pole pomiędzy krzywą zależności zagłębienia od siły danej nawierzchni a osią poziomą 0X oraz odcinkiem pionowym odpowiadającym sile wymuszającej wynoszącej 117 N. Tak wyznaczone parametry

zestawiono w Tab. 7. Zestawienie to uzupełniono również o parametr CEL- metody pośredniej oceny oporu toczenia oraz o wskaźnik średniej głębokości profilu tekstury nawierzchni MPD [81]. Metoda pośrednia CEL została przedstawiona w rozprawie doktorskiej Wojciecha Owczarzaka pod tytułem: „Oscylacyjna metoda oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności” [81]. Polega ona na pośrednim wyznaczeniu strat energetycznych w oponie, która jest poddana swobodnym odbiciom na danej próbce nawierzchni. Metoda ta opiera się na założeniu, że im większe występują straty energetyczne w oponie tym większy jest współczynnik oporu toczenia opony. Zaletą tej metody jest to, że można prowadzić badania na niewielkich próbkach nawierzchni, a rezultaty uzyskiwać w krótkim czasie. Dlatego też wybrano ją jako metodę porównawczą w celu dalszego poszukiwania deskryptora nawierzchni.



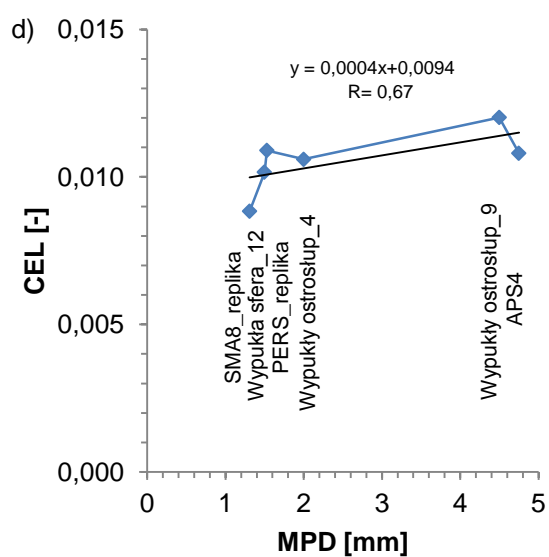
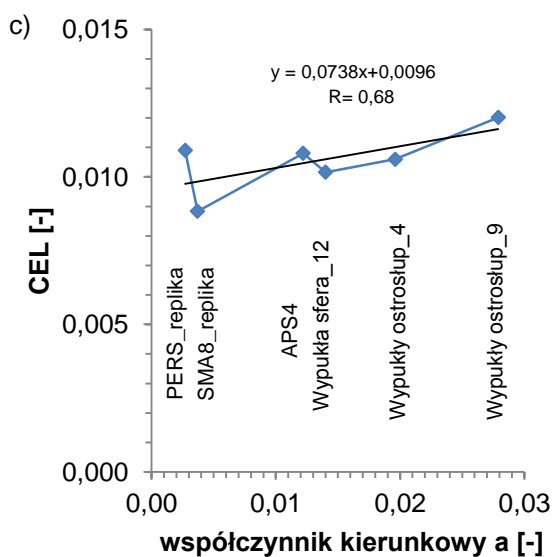
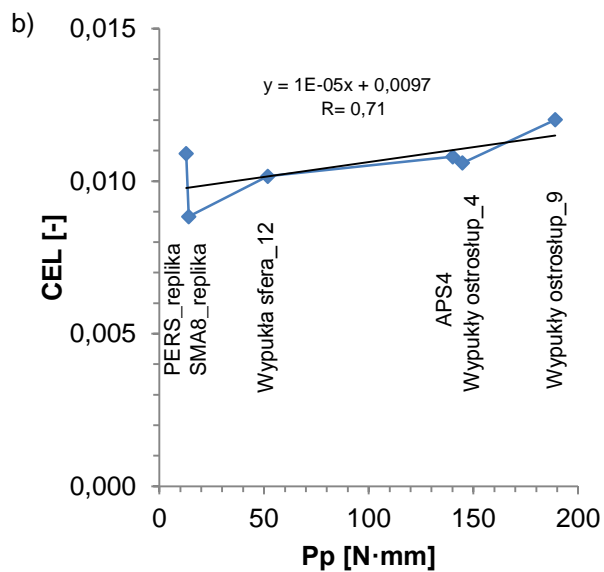
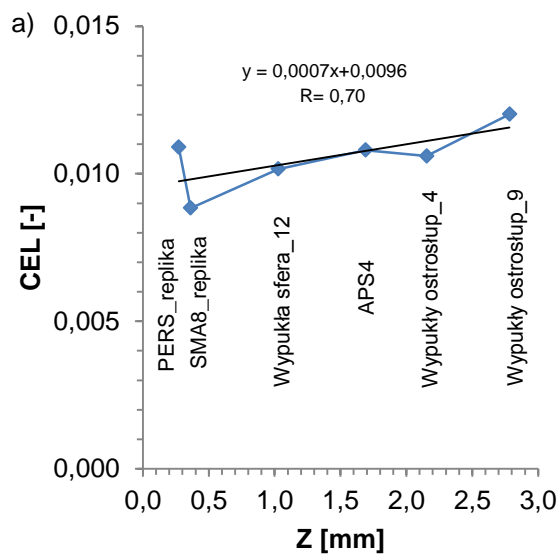
Rys. 37 Zestawienie zagłębienia penetratorów w oponę w funkcji siły wymuszającej dla 6 wybranych nawierzchni.

Tab. 7 Zestawienie parametrów opisujących teksturę dla 6 wybranych nawierzchni.

	Nawierzchnia					
	PERS_replika	SMA8_replika	Wypukła sfera_12	APS4	Wypukły ostrosłup_4	Wypukły ostrosłup_9
a [-]	0,0027	0,0037	0,0140	0,0122	0,0196	0,0279
Pp [N • mm]	12,88	14,11	51,83	140,18	144,82	189,15
CEL [-]	0,0110	0,0088	0,0102	0,0108	0,0106	0,0120
MPD [mm]	1,53	1,31	1,50	4,75	2,00	4,50

W celu oceny jakościowej i porównawczej wybranych parametrów opisujących teksturę zestawiono je ze współczynnikiem CEL pośredniej metody oceny oporu toczenia nawierzchni. Dla wybranych nawierzchni nie był możliwy bezpośredni pomiar oporu toczenia, dlatego też dla celów porównawczych zdecydowano się na metodę pośrednią. Na Rys. 38 przedstawiono korelacje współczynnika CEL w funkcji wybranych parametrów opisujących teksturę tj.: MPD oraz głębokość zanurzenia (Z), pole powierzchni (Pp) i współczynnik kierunkowy (a). W każdym przypadku parametr opisujący teksturę był szeregowany rosnąco. Każdemu punktowi na wykresach zostały przyporządkowane nazwy nawierzchni. Korelacja MPD z wynikami CEL jest niewielka; współczynnik korelacji liniowej wynosi 0,67. Biorąc ponadto pod uwagę niekorzystny rozkład punktów można stwierdzić, że parametr MPD nie nadaje się do opisu tekstury nawierzchni pod kątem jej wpływu na opór toczenia. W przypadku dwóch kolejnych parametrów: głębokości zanurzenia (Z) i pola powierzchni (Pp) uzyskano takie samo uszeregowanie nawierzchni oraz bardzo zbliżony współczynnik korelacji liniowej, wynoszący około 0,7. Jednakże mając na uwadze rozkład punktów należy stwierdzić, że do opisu tekstury nawierzchni wielkość zagłębienia (Z) jest parametrem korzystniejszym niż pole powierzchni (Pp). Ostatnim rozważanym parametrem był współczynnik korelacji liniowej (a), dla której uszeregowanie nawierzchni było podobne z wyjątkiem APS4 i wypukłej sfery_12. W tym wypadku współczynnik korelacji liniowej był podobny i wynosił 0,68. Biorąc pod uwagę niekorzystny rozkład punktów na wykresie, zmienione uszeregowanie nawierzchni, ale przede wszystkim niski współczynnik korelacji liniowej, należy stwierdzić, że współczynnik kierunkowy (a) również nie nadaje się do opisu tekstury nawierzchni.

Mając na uwadze powyższe zestawienie należy stwierdzić, że najkorzystniejszym parametrem opisującym teksturę jest wielkość zagłębienia (Z), pomimo stosunkowo niskiego współczynnika korelacji liniowej, wynoszącego 0,7. Pozostałe parametry miały jeszcze niższy współczynnik korelacji liniowej oraz zmienione uszeregowanie nawierzchni. Niekorzystne efekty przeprowadzonych analiz mogą wynikać z próby znalezienia korelacji z wynikami metody pośredniej. Należy ponadto wziąć pod uwagę, że powierzchnia użytych penetratorów była stosunkowo mała, ponieważ wynosiła zaledwie 3 x 3 cm. W związku z powyższym należy prowadzić dalsze analizy zmierzające do znalezienia parametru lepiej opisującego teksturę nawierzchni w kontekście jej oporu toczenia.



Rys. 38 Korelacja współczynnika CEL metody pośredniej oceny oporu toczenia w funkcji wybranych parametrów: a) Wartości zagłębienia Z dla siły wymuszającej 117 N, b) Pola powierzchni Pp, c) Współczynnika kierunkowego trendu liniowego a, d) funkcji średniej głębokości profilu tekstury nawierzchni MPD.

13. STANOWISKO DO BADANIA TEKSTURY NAWIERZCHNI

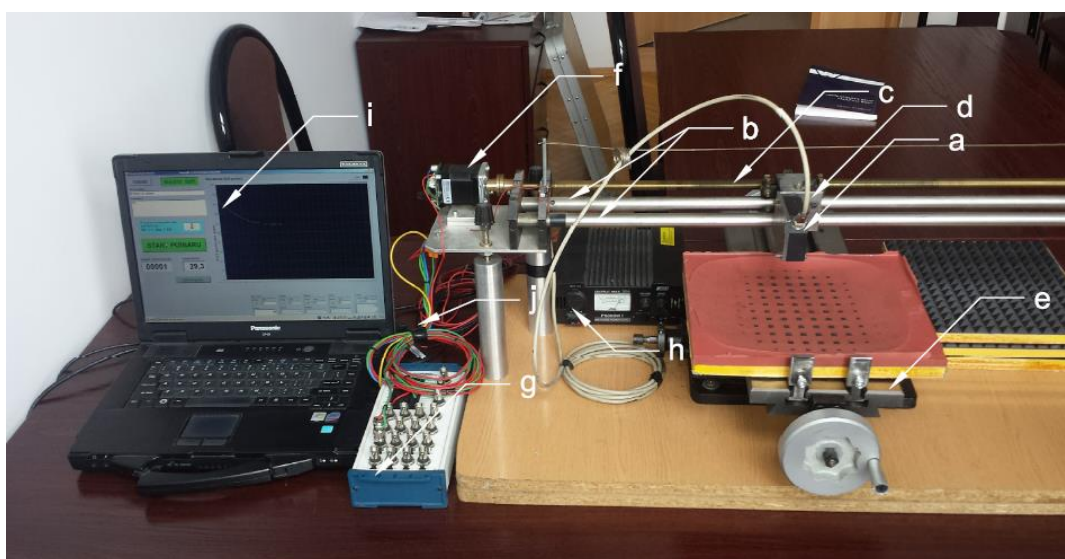
W celu identyfikacji i analizy tekstury nawierzchni należy stworzyć jej cyfrowy opis. To samo podejście można zastosować do opisu elementów nawierzchni, które bezpośrednio kontaktują się z oponą. W tym celu zostało zaprojektowane i wykonane stanowisko do badania tekstury nawierzchni.

Założono, że zjawisko otulania przyjmuje różną intensywność w zależności od tzw. agresywności tekstury nawierzchni, oraz, że można je wyrazić parametrami liczbowymi. Badania przeprowadzono na specjalnie stworzonych nawierzchniach o prostych, powtarzających się kształtach brył geometrycznych, różniących się między sobą wysokością i kształtem tych brył, oraz na nawierzchniach stanowiących odwzorowanie tekstury rzeczywistych nawierzchni drogowych. Do określenia intensywności otulania wykorzystano zagłębienie elementów nawierzchni w oponę oraz objętość wystających części nawierzchni dla prób utrwalonego odcisku opony na nawierzchni o jednakowej powierzchni (50,5 mm x 50,5 mm). Do badań użyto profilometru laserowego.

13.1. Budowa stanowiska

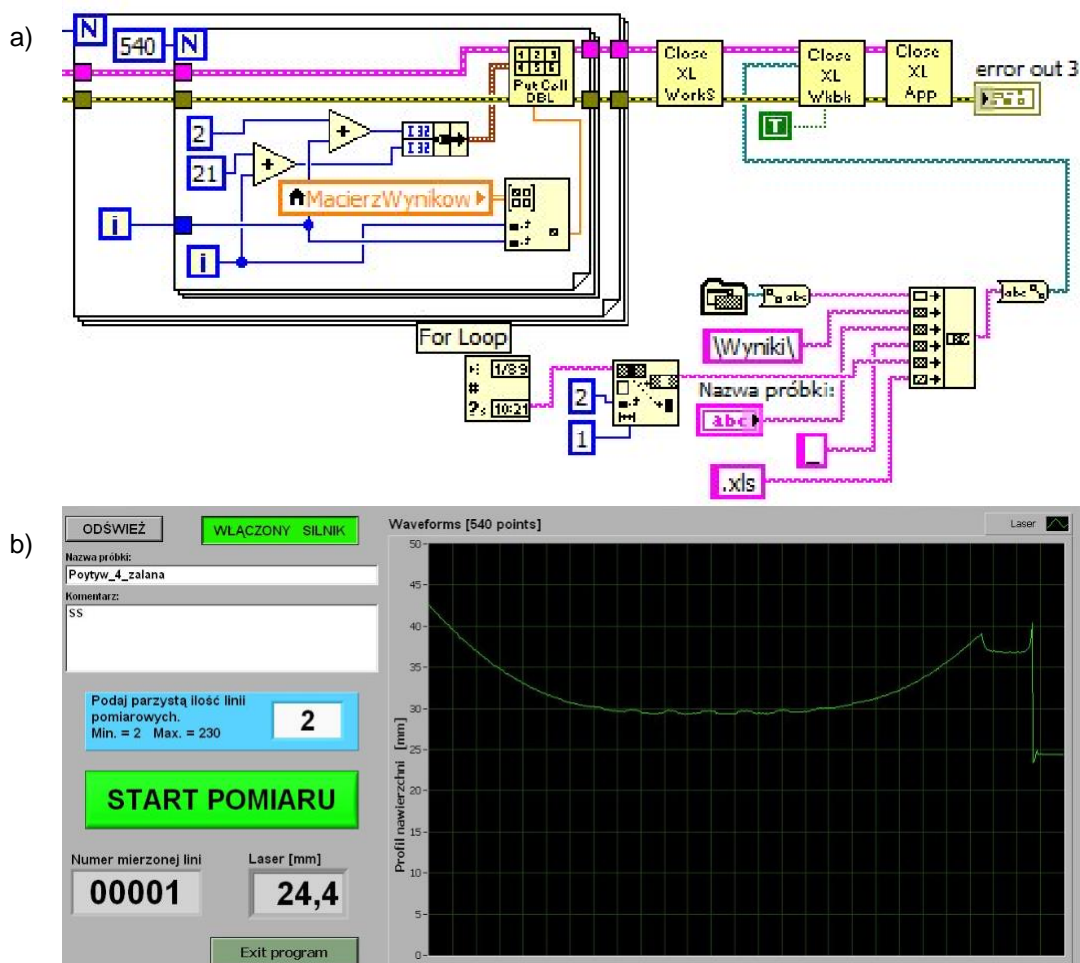
Ze względu na brak dostępu do odpowiedniego skanera 3D skonstruowano stanowisko badawcze – profilometr (Rys. 39). W jego skład wchodzi:

- a) laserowy czujnik przemieszczenia,
- b) prowadnice,
- c) śruba napędowa,
- d) uchwyt lasera,
- e) stół krzyżowy,
- f) silnik krokowy,
- g) kasetka pomiarowa,
- h) zasilacz,
- i) komputer z programem do badania tekstury nawierzchni i rejestracji wyników,
- j) przewody sygnałowe.



Rys. 39 Stanowisko pomiarowe do badania tekstury nawierzchni.

Program do skanowania tekstury nawierzchni stworzono w graficznym środowisku programistycznym LabVIEW (Rys. 40a). Z uwagi na konieczność powrotu lasera skanującego powierzchnię próbki do linii startowej liczba ścieżek musi być parzysta i zawierać się w zakresie od 2 do 200. W czasie pomiaru w oknie „Laser” na bieżąco można odczytywać zmierzoną wysokość nierówności wyrażoną w milimetrach oraz obserwować profil nawierzchni, który jest wyświetlany na czarnym tle (Rys. 40b). Program posiada funkcję, która uniemożliwia wykonanie pomiarów, gdy silnik połączony ze śrubą napędową jest wyłączony.



Rys. 40 Program do sterowania skanerem tekstury nawierzchni: a) fragment schematu blokowego, b) interfejs graficzny.

13.2. Metodyka badawcza

Zbudowane stanowisko pozwala na wykonywanie pomiarów tekstury nawierzchni, a uzyskane w czasie badań wartości wysokości próbki w określonych punktach pomiarowych umożliwiają stworzenie trójwymiarowego modelu odcisku nawierzchni w oponie.

Badane próbki nawierzchni zamocowano z użyciem uchwytów na stole krzyżowym. Stół krzyżowy ustawiono względem plamki laserowego czujnika w taki sposób, aby znalazła się ona w punkcie wyznaczonym jako startowy dla pomiarów badanej próbki. Próbkę względem prowadnic

lasera regulowano w dwóch płaszczyznach; poprzecznie – pokrętkiem, w które wyposażony jest stół krzyżowy, oraz wzdłużnie – śrubą pociągową, umożliwiającą przesuwanie próbki w pełnym zakresie badawczym laserowego czujnika. Laser przemieszcza się wzdłuż próbki badawczej i mierząc odległość pomiędzy czujnikiem a próbką, umożliwia określenie wysokości próbki w tym punkcie. Krok czujnika laserowego wynosi 0,5 mm w kierunku równoległym do prowadnic. Po zmierzeniu zadanej liczby kroków niezbędne jest przesunięcie badanej próbki o 0,5 mm (tzn. odległość odpowiadającą krokowi lasera) w kierunku poprzecznym do prowadnic czujnika laserowego, po czym laser wraca do linii startowej z jednoczesnym wykonywaniem pomiarów. Próbkę należy za każdym przejściem lasera przesuwać, aż do zbadania całego profilu próbki (Rys. 41).



Rys. 41 Schemat poruszania się czujnika laserowego.

Uzyskiwane wyniki pomiarów zapisywane są w postaci macierzy wysokości próbki w określonych punktach pomiarowych (Rys. 42). Uzyskane dane umożliwiają obliczenie powierzchni oraz objętości wystających elementów tekstury, która zagłębiła się w bieżnik opony.

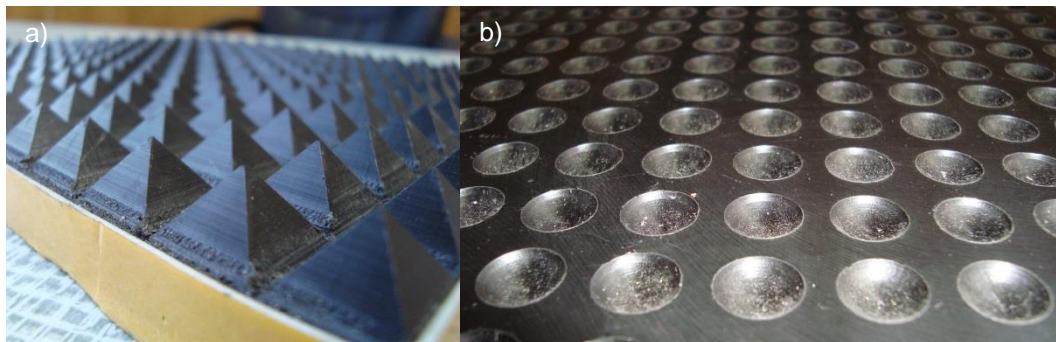
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
2	0,5	50,75	31,36	31,33	32,49	32,52	32,23	32,23	31,91	31,93	31,92	31,91	31,91	31,92	32,27
3	1	50,73	31,33	31,33	32,51	32,46	32,23	32,21	31,93	31,93	31,92	31,93	31,92	31,91	32,33
4	1,5	50,73	31,32	31,34	32,52	32,50	32,24	32,23	31,91	31,95	31,91	31,93	31,91	31,93	32,18
5	2	50,72	31,33	31,31	32,51	32,49	32,22	32,22	31,93	31,91	31,95	31,91	31,86	31,92	32,30
6	2,5	50,72	31,34	31,36	32,50	32,51	32,23	32,22	31,92	31,93	31,92	31,91	31,92	31,94	32,30
7	3	50,74	31,33	31,30	32,47	32,49	32,23	32,21	31,95	31,92	31,93	31,92	31,89	31,91	32,20
8	3,5	50,72	31,36	31,33	32,51	32,46	32,25	32,25	31,91	31,91	31,87	31,93	31,93	31,92	32,31
9	4	50,74	31,34	31,31	32,49	32,50	32,22	32,24	31,93	31,92	31,92	31,92	31,93	31,93	32,29
10	4,5	50,73	31,33	31,34	32,53	32,50	32,21	32,19	31,93	31,93	31,96	31,91	31,89	31,91	32,30
11	5	50,75	31,32	31,32	32,48	32,48	32,24	32,21	31,92	31,91	31,93	31,93	31,93	31,92	32,31
12	5,5	50,68	31,36	31,33	32,47	32,51	32,23	32,23	31,91	31,93	31,93	31,90	31,91	31,91	32,29
13	6	50,72	31,29	31,33	32,51	32,48	32,25	32,23	31,93	31,94	31,92	31,92	31,92	31,92	32,30
14	6,5	50,70	31,34	31,33	32,49	32,51	32,16	32,23	31,91	31,87	31,95	31,91	31,93	31,90	32,27
15	7	50,70	31,32	31,34	32,49	32,49	32,23	32,19	31,92	31,80	31,89	31,89	31,90	31,92	32,28
16	7,5	50,73	31,31	31,32	32,51	32,49	32,22	32,23	31,92	31,94	31,91	31,89	31,92	31,91	32,28
17	8	31,85	31,34	32,17	32,48	32,25	32,23	32,50	31,90	31,91	31,88	31,90	31,91	32,24	32,30
18	8,5	32,32	32,05	32,27	32,33	32,35	32,31	32,28	31,91	32,30	31,91	32,30	32,02	32,30	32,30
19	9	32,32	32,21	32,38	32,34	32,33	32,23	32,24	32,24	32,28	32,29	32,21	32,26	32,24	32,26
20	9,5	32,05	32,35	32,07	32,29	32,16	32,23	32,07	32,15	32,23	32,25	32,28	32,23	32,39	32,16
21	10	32,51	31,83	32,69	31,97	32,70	32,30	32,72	32,18	32,68	32,18	32,77	32,28	32,77	32,31
22	10,5	32,56	32,64	32,67	32,66	32,63	32,68	32,70	32,73	32,77	32,81	32,79	32,75	32,81	32,79
23	11	32,56	32,64	32,76	32,69	32,73	32,62	32,76	32,62	32,77	32,71	32,76	32,70	32,82	32,73
24	11,5	32,65	32,66	32,75	32,66	32,74	32,70	32,82	32,69	32,78	32,75	32,85	32,78	32,90	32,72
25	12	32,64	32,63	32,72	32,69	32,69	32,75	32,73	32,69	32,79	32,72	32,69	32,76	32,88	32,72

Rys. 42 Przykładowy fragment uzyskanej macierzy danych.

13.3. Opracowane próbki do badania tekstury nawierzchni

W celu analizy współpracy opony z nawierzchnią opracowano szereg próbek o regularnej teksturze oraz teksturze odpowiadającej rzeczywistym nawierzchniom. Regularną teksturę nawierzchni stanowiły ostrosłupy lub odwrócone ostrosłupy o podstawie kwadratu (16 x 16 mm) i różnych wysokościach (1 – 9 mm) (Rys. 43a), oraz sfer i odwróconych sfer (Ø 12 mm) i jednakowej wysokości (3 mm) (Rys. 43b). Nawierzchnie te nazywano, odpowiednio, wypukłymi i wklęsłymi (Załącznik 1).

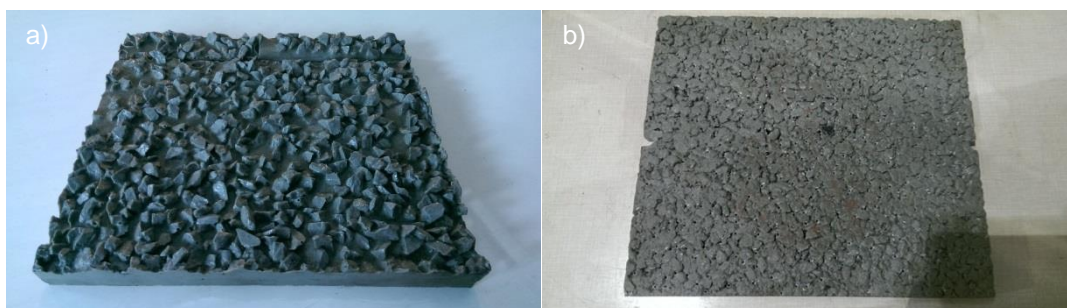
Próbki nawierzchni zbudowane w oparciu o ostrosłupy wklęsłe oraz wypukłe są odpowiednikiem nawierzchni mniej lub bardziej agresywnej tekstury. Stopień agresywności jest uzależniony od wysokości ostrosłupa (jeżeli jest wypukły) lub jego głębokości (jeżeli jest wklęsły). Kolejne wytworzone próbki nawierzchni, które zostały zaprojektowane w oparciu o sferę wklęsłą (głębokość 3 mm) lub wypukłą (wysokość 3 mm), są odpowiednikiem nawierzchni o łagodnej teksturze.



Rys. 43 Nawierzchnie o regularnej teksturze: a) wypukłe ostrosłupy, b) wklęsłe sfery.

Nawierzchnie wypukłe składające się z ostrosłupów zostały wykonane metodą obróbki ubytkowej i posłużyły do przygotowania nawierzchni wklęsłych, wykonanych metodą odlewania z użyciem żywicy epoksydowej. Nawierzchnie składające się ze sfer przygotowano w sposób analogiczny, ale ze względu na łatwość wykonania – w odwrotnej kolejności.

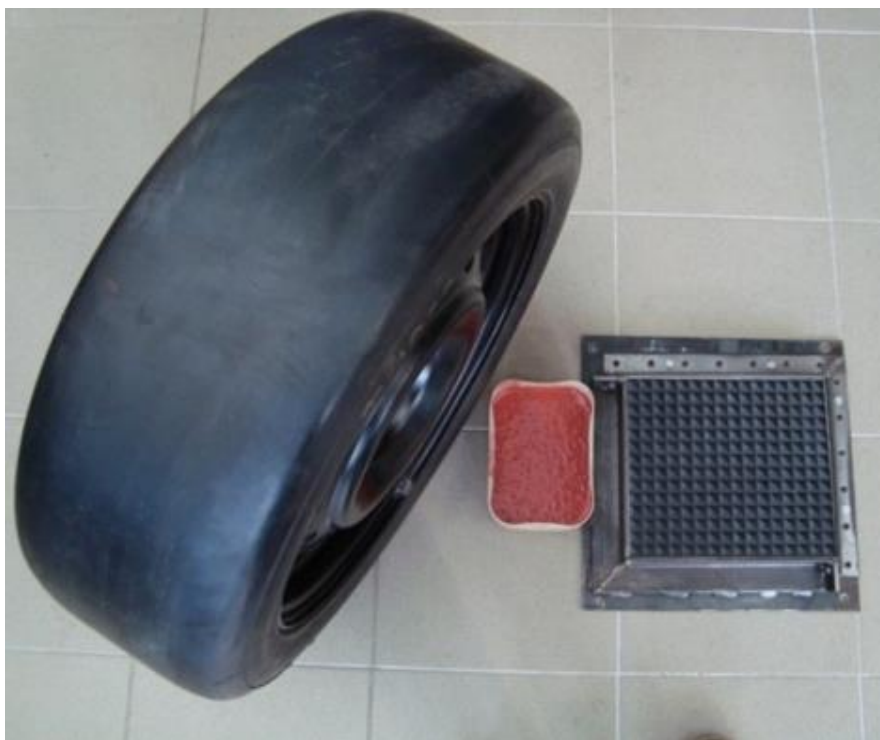
Próbki należące do drugiej grupy badanych nawierzchni (PERS, APS4, SMA8) wykonano metodą odlewania (Rys. 44).



Rys. 44 Repliki rzeczywistych nawierzchni drogowych: a) APS4, b) SMA8.

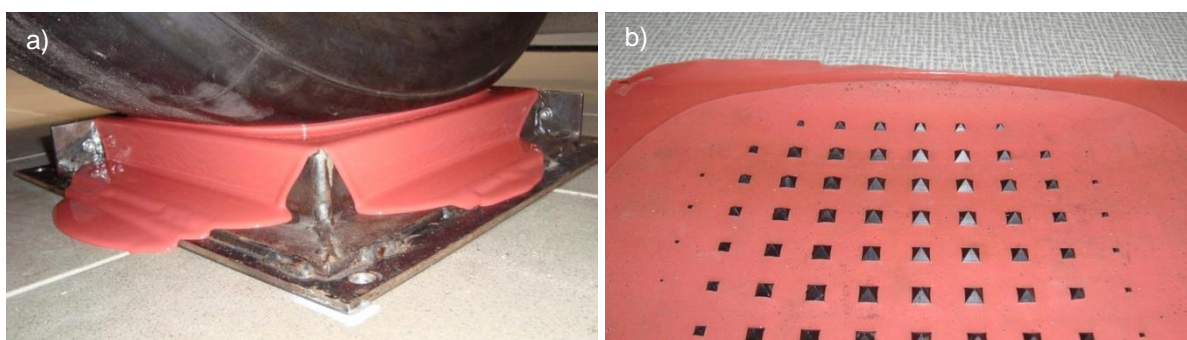
13.4. Odciski opony na nawierzchni badawczej

Aby zidentyfikować elementy tekstury nawierzchni bezpośrednio kontaktujące się z oponą opracowano unikatową metodykę utrwalania 3-wymiarowego odcisku opony na różnego rodzaju nawierzchniach. W badaniach zastosowano oponę Vredestein Slick o rozmiarze 235/45R17 94W (Rys. 45). Ciśnienie w kole ustawiono na 210 kPa, a obciążenie wynosiło 4157,5 N. Temperatura w pomieszczeniu badawczym wynosiła 25°C. Próbkę nawierzchni umieszczano w formie, której boczne krawędzie były wyższe niż próbka nawierzchni, celem zatrzymania pożądanej ilości silikonu w formie. Powierzchnia tak uzyskanego odcisku odpowiada kształtowi bieżnika opony opartej na nierównościach tekstury. Tak utrwalony ślad opony ujawnia nie tylko obszar styku z nierównościami nawierzchni, ale również kształt „mostków” gumy pomiędzy sąsiadującymi wierzchołkami tekstury.



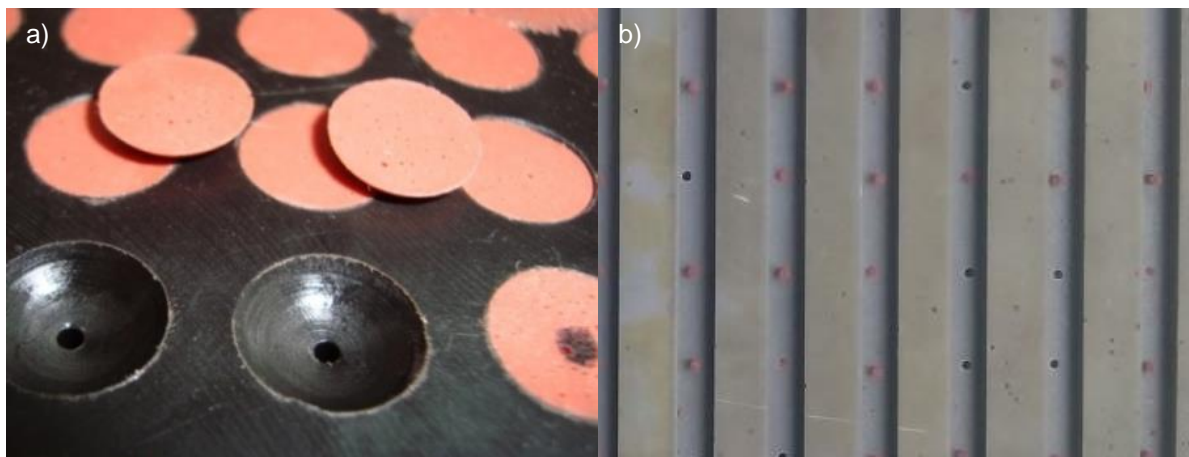
Rys. 45 Stanowisko do wykonywania odcisków opony: badane koło, silikon do odlewania, badana replika umieszczona w ramce.

Opona badawcza została pokryta środkiem antyadhezyjnym, a następnie dociśnięta do wypoziomowanej nawierzchni pokrytej silikonem z zadaną siłą (Rys. 46a). Po czasie niezbędnym do utrwalenia odcisku (około 12 godz.) podnoszono koło i po usunięciu nadmiaru silikonu wyciągano odcisk opony w nawierzchni (Rys. 46b).



Rys. 46 Utrwalanie odcisku opony na nawierzchni: a) opona ustawiona na nawierzchni i wypełniona silikonem odlewniczym, b) uwidocznione elementy nawierzchni, które miały bezpośredni kontakt z oponą.

Podczas wykonywania odcisków na nawierzchniach wklęsłych zaobserwowano zafalszowania w postaci tzw. kieszeni powietrznych. W celu zniwelowania tego efektu i umożliwienia przepływu silikonu przez całą wysokość nierówności nawierzchni wykonano w dnie każdej nierówności otwory (\varnothing 1 mm). Wszystkie otwory zostały ze sobą połączone za pomocą wyfrezowanych rowków i otworów na przeciwległych brzegach próbek nawierzchni, które umożliwiły pozbycie się nadmiaru powietrza i silikonu (Rys. 47).



Rys. 47 Odcisk opony na nawierzchni Wkłęsa sfera_3: a) nawierzchnia Wkłęsa sfera_3 z odkrytymi otworami odpowietrzającymi, b) spód nawierzchni Wkłęsa soczewka_3 z rowkami odpowietrzającymi.

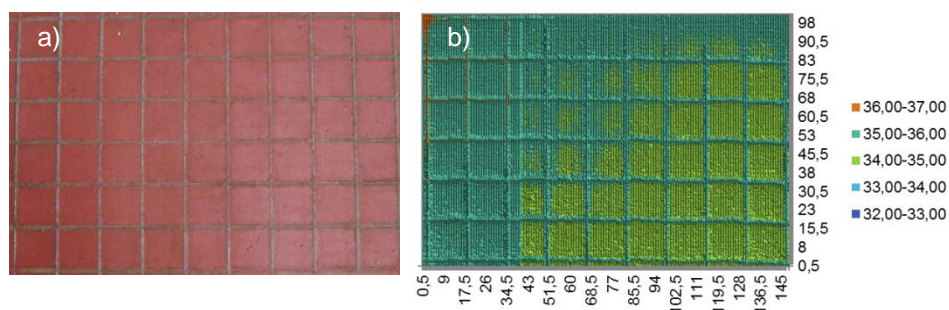
Podobny zabieg, czyli otwory i rowki odpowietrzające, zastosowano w badaniach z użyciem replik rzeczywistych nawierzchni (Rys. 48).



Rys. 48 Replika nawierzchni SMA8 z otworami odpowietrzającymi.

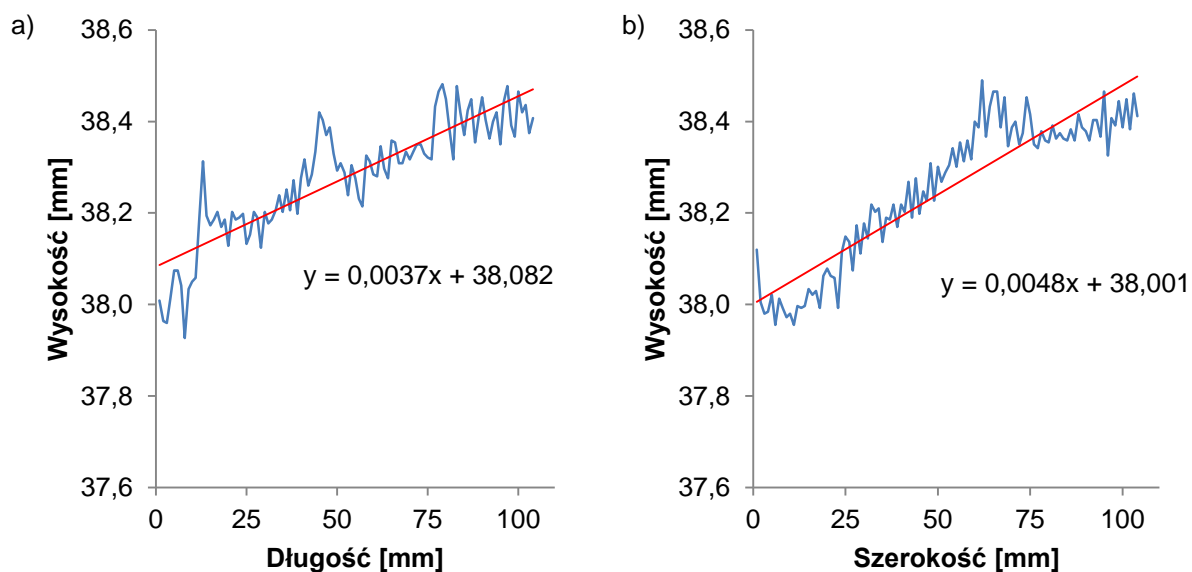
14. MATEMATYCZNA ANALIZA ELEMENTÓW TEKSTURY NAWIERZCHNI WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z OPONĄ

W wyniku zeskanowania próbek odcisków (Rys. 49a) otrzymano zbiór danych w postaci współrzędnych XYZ, gdzie XY opisują położenie punktu pomiarowego, a Z jego wysokość. (Rys. 49b).



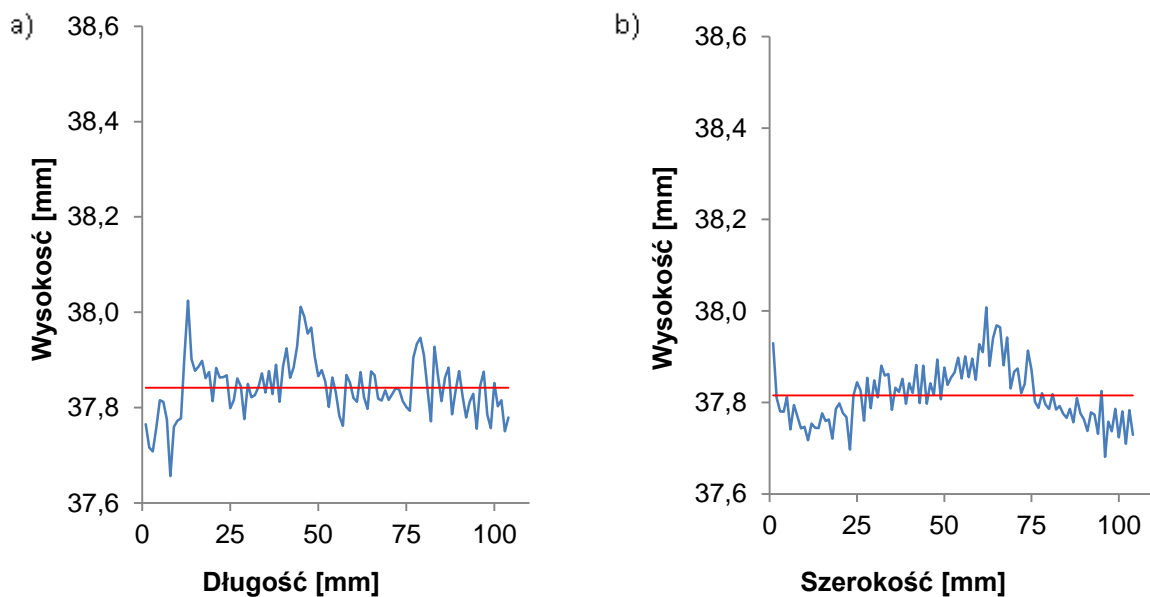
Rys. 49 Odcisk gładkiej opony na nawierzchni wzorcowej (Wklęsy ostrosłup_3), a) fotografia odcisku opony, b) cyfrowy zapis powierzchni odcisku.

Analizując pionowe przekroje powierzchni opisujących próbki zarówno nawierzchni, jak i odcisków opony, zauważono, że niezbędne jest dwuosiowe poziomowanie obrazu. W tym celu zeskanowany obraz przecięto umownie w kierunku wzdłużnym i poprzecznym (Rys. 50).



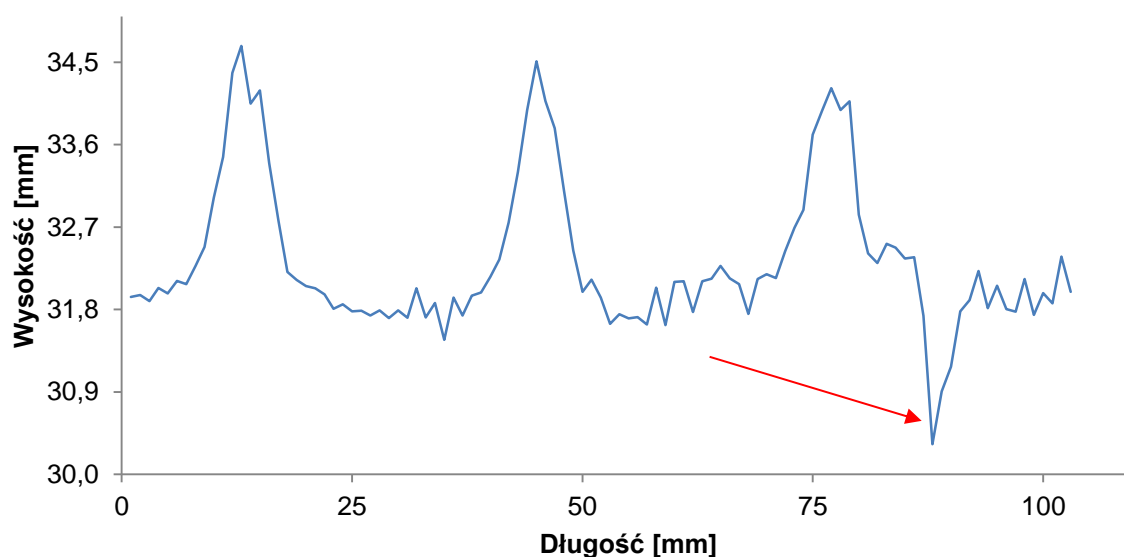
Rys. 50 Przekrój przez środek odcisku opony na nawierzchni Wklęsy ostrosłup_6: a) w kierunku wzdłużnym, b) w kierunku poprzecznym (w stosunku do prowadnic lasera).

W celu poziomowania obrazu próbki przy pomocy metody najmniejszych kwadratów wyznaczono funkcję liniową opisującą wysokość przekroju w kierunku wzdłużnym (Rys. 50a) oraz poprzecznym (Rys. 50b). Znajomość współczynnika kierunkowego i rzędnej trendu liniowego umożliwia wypoziomowanie całej matrycy danych (Rys. 51).



Rys. 51 Efekt wy poziomowania zeskanowanego odcisku opony: a) w kierunku wzdłużnym, b) w kierunku poprzecznym.

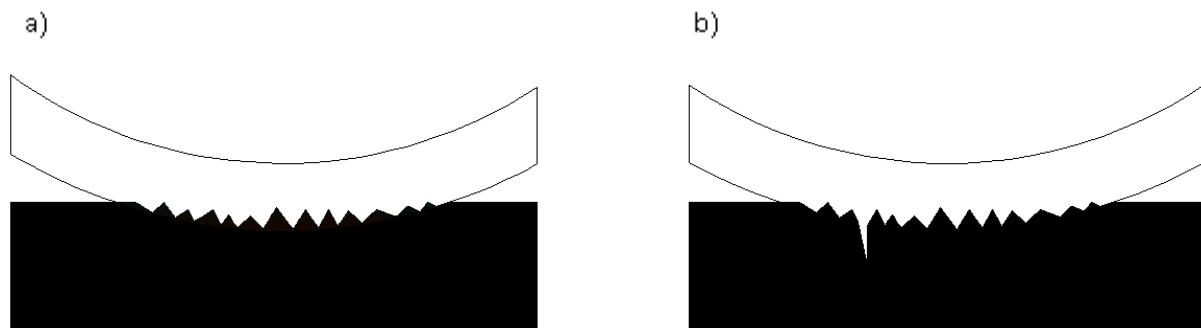
Z analizy przekrojów zeskanowanych próbek wynika, że istnieją błędy pomiarowe czujnika laserowego w postaci zarejestrowanych nieprawidłowych wartości liczbowych opisujące wysokości nierówności (Rys. 52).



Rys. 52 Przekrój skanu odcisku opony. Strzałką wskazano nieprawidłowo zmierzoną wartość.

Błędy pomiarowe czujnika laserowego utrudniają znalezienie rzeczywistego zagłębienia nawierzchni w oponę (Rys. 53). Z tego powodu konieczna jest korekcja zakłóceń. Z uwagi na stopień skomplikowania powierzchni korekcja mogła być prowadzona w sposób ręczny. Z uwagi na ilość przeskanowanych powierzchni korekcja taka jest czasochłonna oraz wymaga dużego doświadczenia i uwagi. Błędy czujnika laserowego występują wtedy, gdy zachodzi przesłanianie wiązki przez

sąsiednie elementy nawierzchni albo gdy w wykonanym odlewie znajdują się mikropęcherzyki powietrza. W celu prowadzenia dalszych analiz na tym etapie wszystkie znaczące błędy zostały wyeliminowane.



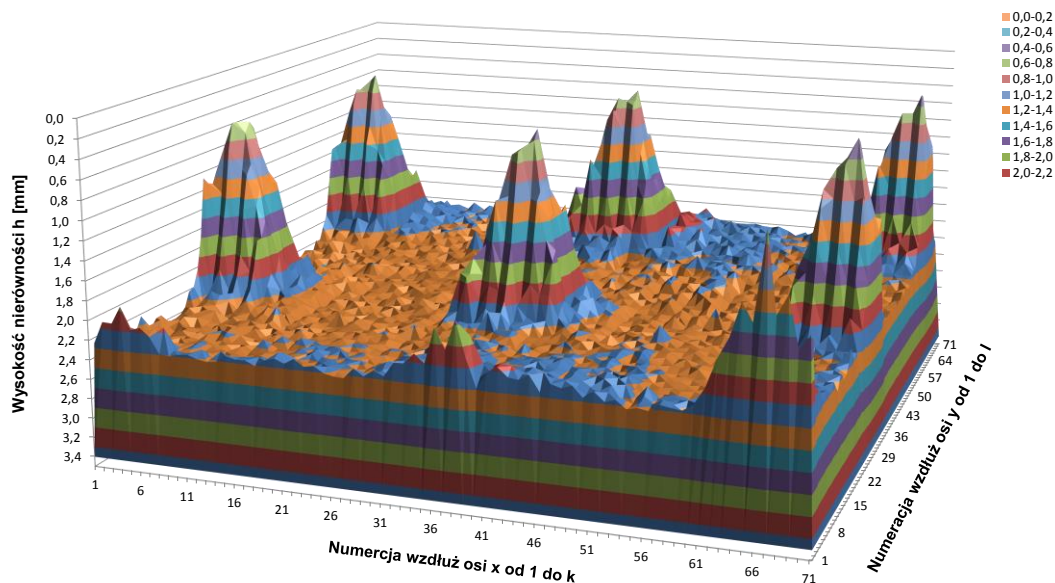
Rys. 53 Styk opony z nawierzchnią: a) rzeczywisty, b) odtworzony na podstawie zapisu cyfrowego.

W celu wyznaczenia objętości tej części nawierzchni, która zagłębiła się w oponę, wykorzystano metodę całkowania numerycznego. Na Rys. 54 przedstawiono fragment utrwalonego odcisku opony, który został wcześniej zeskanowany. Uwidocznione nierówności powierzchni reprezentują te elementy nawierzchni, które zanurzyły się w oponę. Z uwagi na to, że skaner laserowy pracował z krokiem 0,5 mm to płaszczyzna xy mogła być podzielona na n kwadratów o boku 0,5 mm. Kwadraty te zostały ponumerowane wzdłuż osi x od 1 do k , a wzdłuż osi y od 1 do l . Dzięki temu każdy punkt powierzchni mógł być aproksymowany prostopadłością o podstawie kwadratowej 0,5 x 0,5 mm i wysokości h równiej wysokości punktu położonego na płaszczyźnie utrwalonego odcisku. Objętość elementów nawierzchni zanurzonych w oponę opisuje zależność (15).

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l 0,25mm^2 \cdot h_{ij} \quad (15)$$

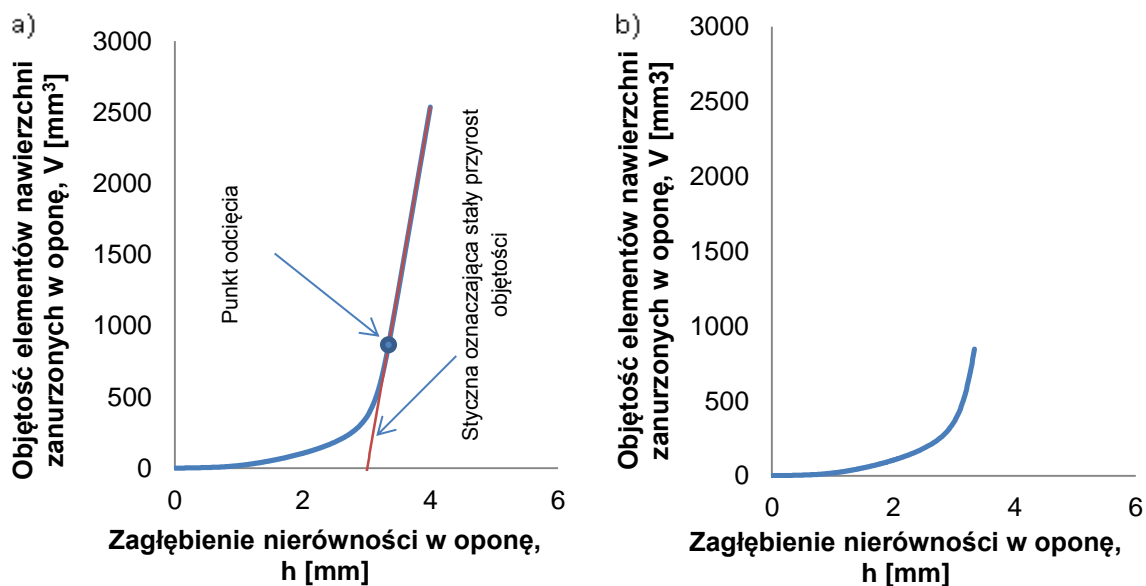
gdzie: V - objętość elementów nawierzchni zanurzonych w oponę, k - ilość elementów wzdłuż osi Ox , l - ilość elementów wzdłuż osi Oy , h_{ij} - wysokość nierówności względem odcisku czoła opony.

Do całkowania numerycznego objętości używano płaszczyzny równoległej do osi xy , która jest przemieszczana od najwyższej nierówności w kierunku podstawy z krokiem 0,01 mm. Dzięki takiemu zabiegowi można było wyznaczyć przyrost objętości w funkcji głębokości zanurzenia nierówności w oponę (Rys. 55). Na tym wykresie głębokość 0 mm reprezentuje dotknięcie przez oponę najwyższej nierówności. Opuszczanie opony na nierówności nawierzchni odpowiada przemieszczaniu się po osi poziomej w prawą stronę na Rys. 55a. Dalsze zanurzanie nierówności w oponę skutkuje coraz większym przyrostem objętości, aż do osiągnięcia stałej wartości jej przyrostu, co oznacza, że wszystkie nierówności nawierzchni zagłębiły się w oponę.



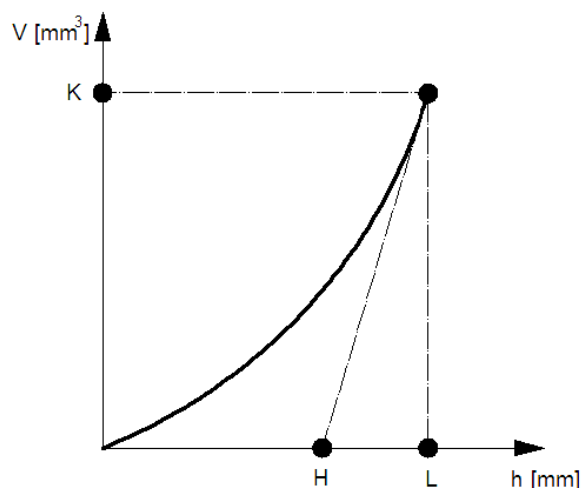
Rys. 54 Utrwalony odlew odcisku opony podzielony na elementarne objętości.

W celu wyznaczenia objętości wszystkich nierówności nawierzchni, które zanurzyły się w oponę, niezbędne jest wyznaczenie granicy całkowania, tj. punktu, w którym krzywa przyrostu objętości przechodzi w prostą (prosta oznacza stały przyrost objętości, Rys. 55a). Punkt kontaktu stycznej z krzywą oznacza punkt odcięcia, który ustala objętość nierówności zanurzonych w oponę. Fizycznie krzywa jest odcinana w miejscu, gdzie różnica objętości pomiędzy funkcją $V = f(h)$ a styczną jest mniejsza od 2 mm^3 . Inaczej mówiąc, zakończono numeryczne całkowanie objętości (górną granicę całkowania) osiągając płaszczyznę styku czoła bieżnika opony z nawierzchnią, co reprezentuje Rys. 55b.



Rys. 55 Przyrost objętości elementów tekstury penetrujących bieżnik opony w funkcji zagłębienia: a) wyznaczenie stycznej do krzywej, b) wyznaczenie maksymalnej głębokości w obliczeniach objętości, tj. górnej granicy całkowania.

Analizując zależność przyrostu objętości w funkcji zagłębienia $V = f(h)$ można wyróżnić trzy charakterystyczne punkty, które przedstawiono na Rys. 56. Punkt K oznacza objętość elementów nierówności nawierzchni zanurzonych w oponę, a punkt L oznacza maksymalną wartość głębokości zanurzenia tych elementów. Ostatnim punktem charakterystycznym jest punkt H. Powstał on na skutek przebiccia osi Ox styczną, która jest tożsama ze styczną przedstawioną na Rys. 55a.

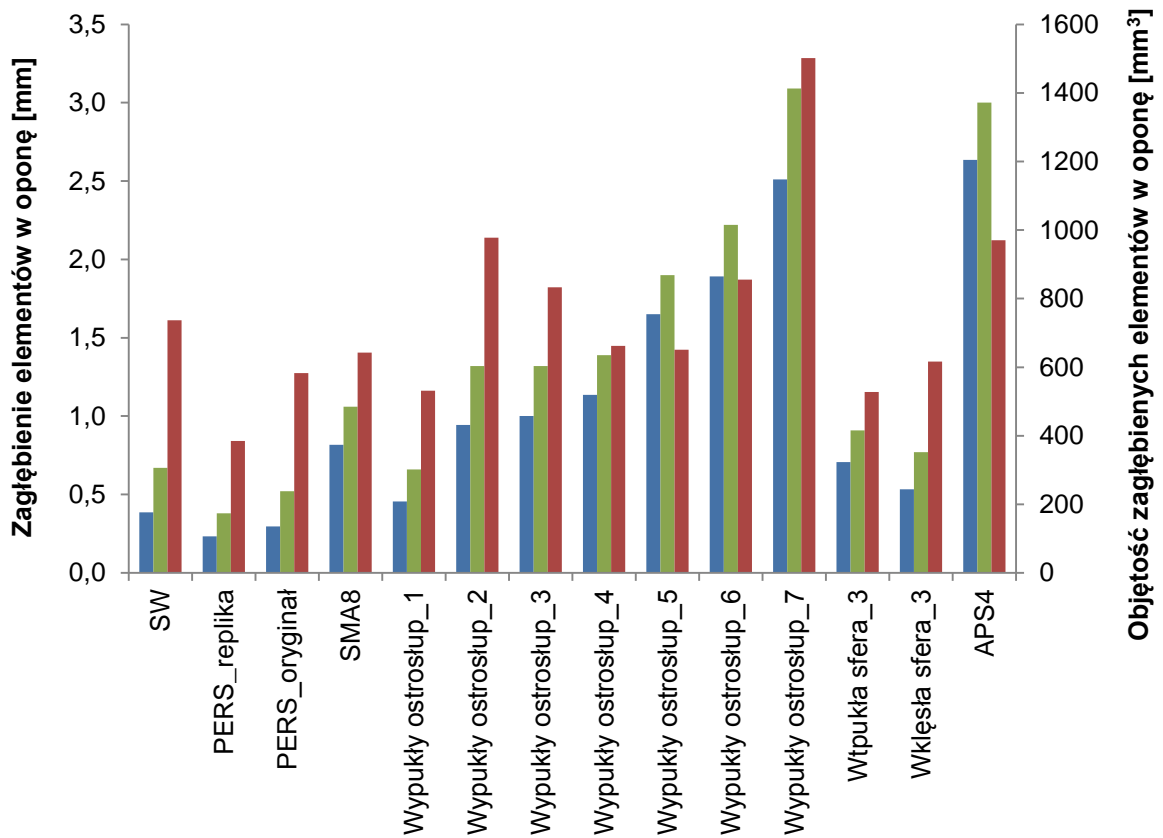


Rys. 56 Zależność przyrostu objętości w funkcji zagłębienia $V = f(h)$ oraz charakterystyczne punkty.

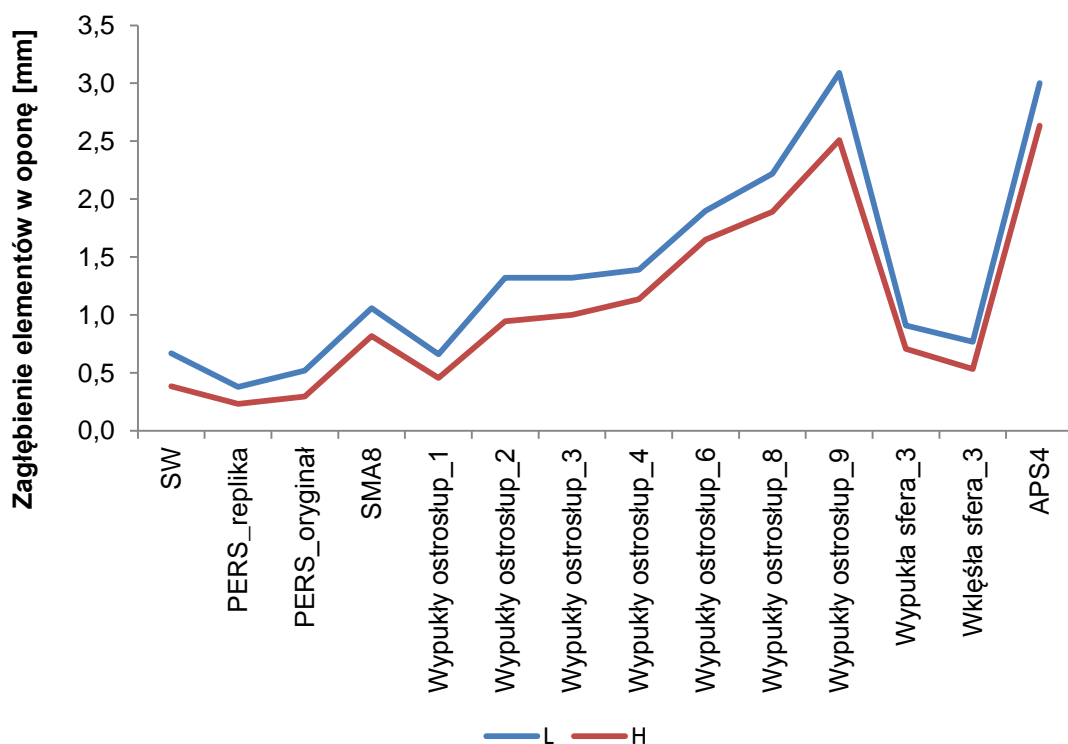
W celu analiz parametrów H, K, L został wybrany zestaw rzeczywistych nawierzchni lub ich replik oraz próbki nawierzchni wzorcowych, łącznie czternaście próbek nawierzchni. Wśród nich znajdują się próbki nawierzchni rzeczywistych o łagodnej lub agresywnej teksturze. W tym zestawie umieszczono również dziewięć wzorcowych nawierzchni, których stopień agresywności tekstury zmienia się od bardzo łagodnej do bardzo agresywnej. Otrzymane rezultaty zestawiono na wykresie przedstawionym na Rys. 57. Można zauważyć tendencję polegającą na tym, że im tekstura jest bardziej agresywna, tym wielkość maksymalnego zagłębienia nierówności w oponę L oraz objętość tych elementów K są coraz większe. Niemniej jednak te dwa parametry w różny sposób wiążą się z agresywnością tekstury. Analizując ten wykres można zauważyć, że maksymalne zagłębienie nierówności w oponę (L) oraz punkt przebiccia osi Ox przez styczną (H) mają podobny trend, przedstawiony na Rys. 58. Dlatego do dalszych analiz zrezygnowano z parametru H (punkt przebiccia osi Ox przez styczną).

Do dalszych analiz wytypowano parametry L (maksymalne zagłębienie nierówności w oponę), K (objętość elementów zanurzonych w oponę) oraz nowy parametr SIOIZ (suma iloczynów objętości i zagłębienia). Parametr ten powstał poprzez zsumowanie iloczynów objętości oraz głębokości zanurzenia elementów tekstury w oponę (16). Zabieg ten zastosowano, aby zwiększyć wpływ głębokości nierówności tekstury na parametryczny opis tej części nierówności, która bezpośrednio współpracuje z oponą.

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l 0,25mm^2 \cdot h_{ij}^2 \quad (16)$$

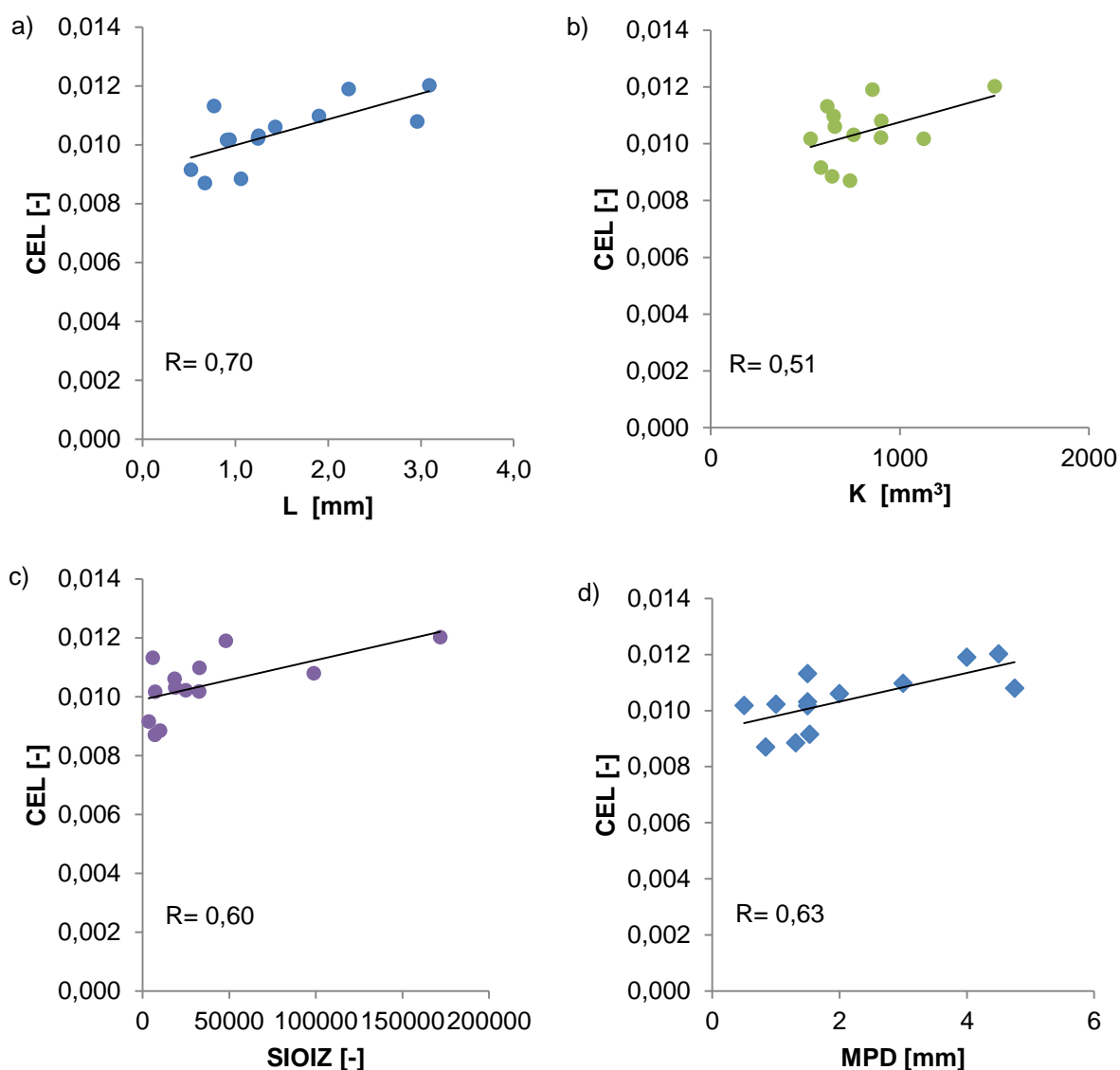


Rys. 57 Zestawienie L, H, K.



Rys. 58 Maksymalne zagłębienie nierówności w oponę (L) oraz punkt przebiecia osi 0x styczną (H) dla 14 próbek nawierzchni.

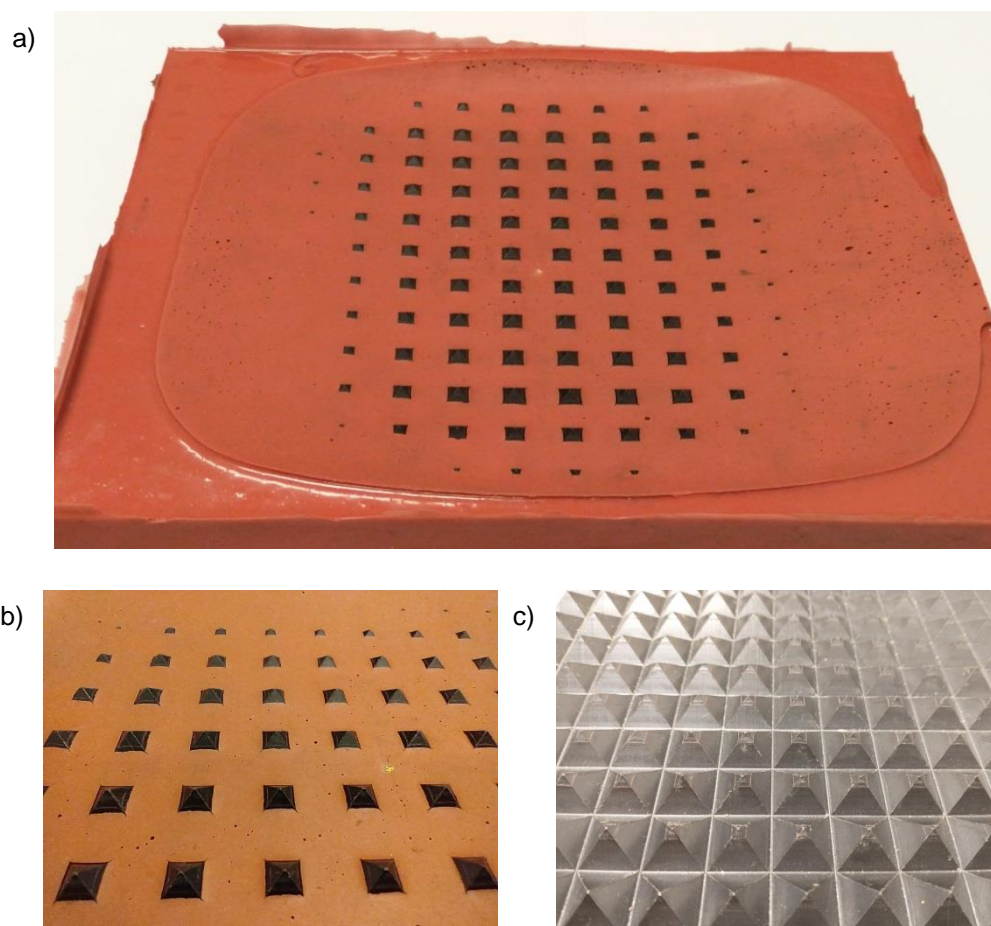
Na Rys. 59 zestawiono korelacje wcześniej wybranych parametrów oraz MPD, z wynikami pośredniej oceny oporu toczenia CEL. Analizując uzyskane zależności, parametr K ma najniższy współczynnik korelacji, wynoszący 0,51. Nieznacznie wyższy współczynnik korelacji uzyskują SIOIZ oraz MPD, ze współczynnikiem korelacji liniowej, odpowiednio, 0,60 oraz 0,63. Najwyższy współczynnik korelacji liniowej, 0,70, uzyskał parametr L, opisujący maksymalne zagłębienie nierówności w oponę. Podsumowując, należy stwierdzić, że głębokość zanurzenia elementów nierówności w oponę ma największą korelację z wynikami metody CEL spośród wytypowanych parametrów, a Wytypowane parametry nie opisują elementów tekstury znacząco lepiej niż parametr MPD.



Rys. 59 Korelacja pomiędzy metodą pośrednią wyznaczania oporu toczenia CEL a poszczególnymi parametrami: a) L (maksymalne zagłębienie nierówności w oponę), b) K (objętość elementów zanurzonych w oponę), c) SIOIZ (suma iloczynów objętości i zagłębienia), d) MPD (średnia głębokość profilu nawierzchni).

15. PROPOZYCJA METODY OCENY TEKSTURY NAWIERZCHNI DO WYZNACZANIA OPORÓW TOCZENIA

Kolejnym krokiem było poddanie analizie odcisków opony wykonanych na próbkach nawierzchni, w celu znalezienia parametru opisującego wielkość elementów nierówności nawierzchni współpracujących z oponą, który w zadowalający sposób korelowałby się z oporem toczenia. Na Rys. 60 przedstawiono przykładowe odciski opony wykonane na próbkach nawierzchni o agresywnej teksturze.



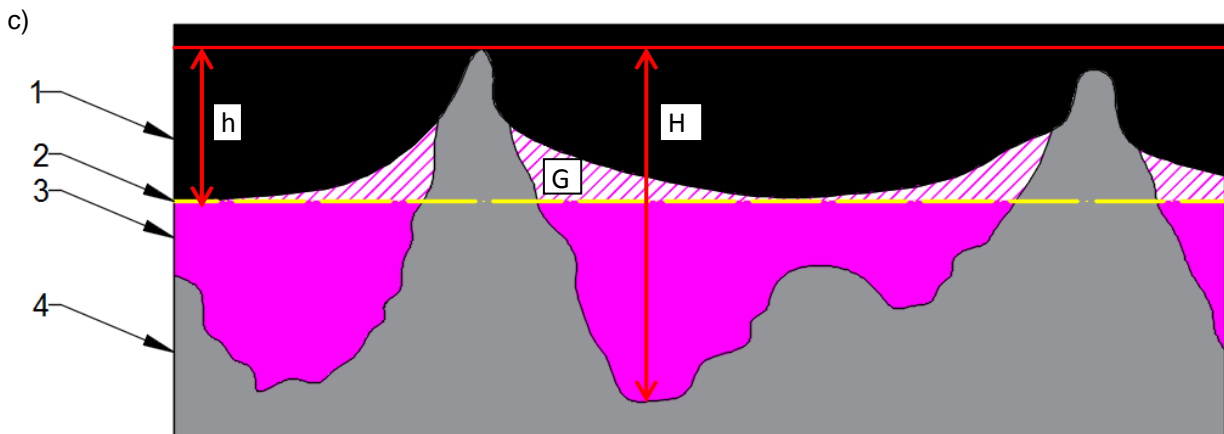
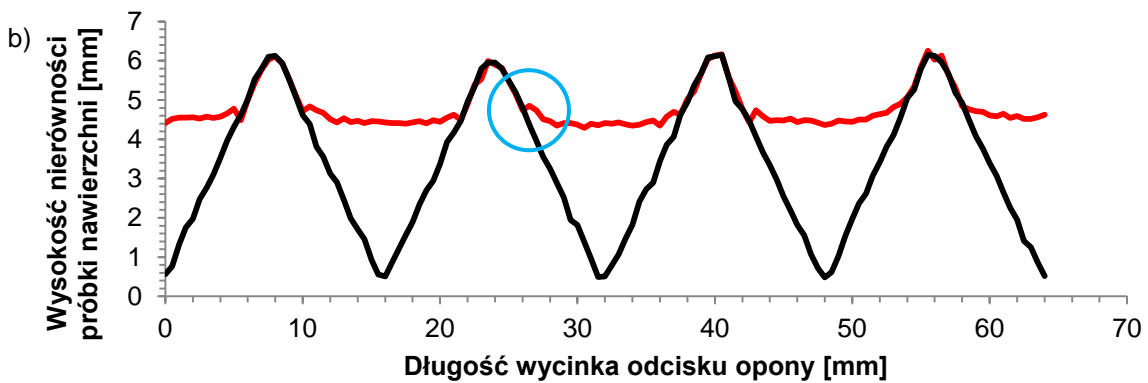
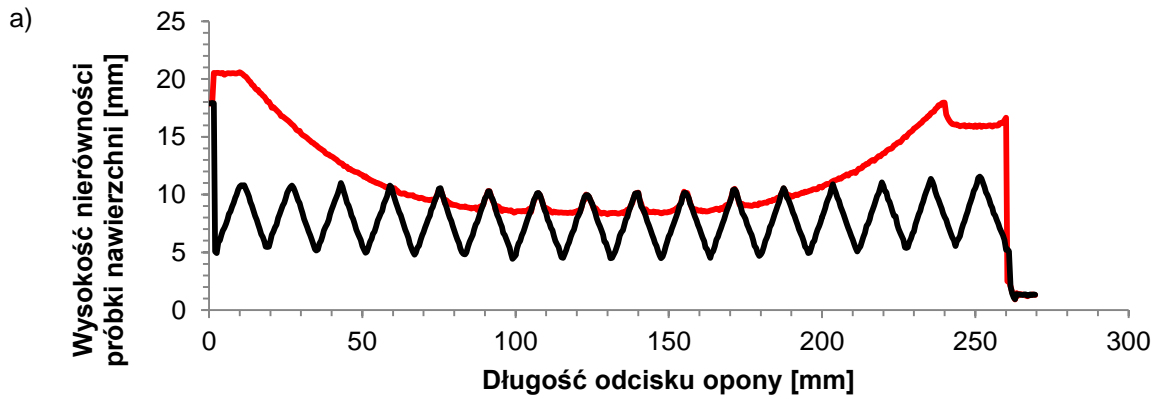
Rys. 60 Utrwalony odcisk opony na nawierzchni z wypukłymi ostrosłupami: a) widok na cały odcisk opony, b) zbliżenie na wystające elementy nawierzchni z odcisku opony, c) fragment nawierzchni ze zdjętym odciskiem opony.

Na agresywnej teksturze obserwuje się zjawisko, które polega na tym, że wokół wysokich nierówności silikon odlewniczy zastygał powyżej płaszczyzny odniesienia. Powstała ona poprzez poprowadzenie płaszczyzny stycznie do najniższych punktów bieżnika opony (żółta linia na Rys. 61). Wynika to z tego, że opona opiera się o szczyty nierówności tekstury, a pomiędzy nimi bieżnik nie ma kontaktu z nawierzchnią. W miejscach kontaktu bieżnik przyjmuje kształt tekstury nawierzchni, a w przypadku jego braku guma bieżnika uwypukla się w dół. Stąd wokół wysokich nierówności powstają przestrzenie (objętości nad płaszczyzną odniesienia - wielkość G na Rys. 61) wynikające z odkształcenia gumy bieżnika. Wyznaczenie objętości odkształcenia bieżnika opony jest niezbędne

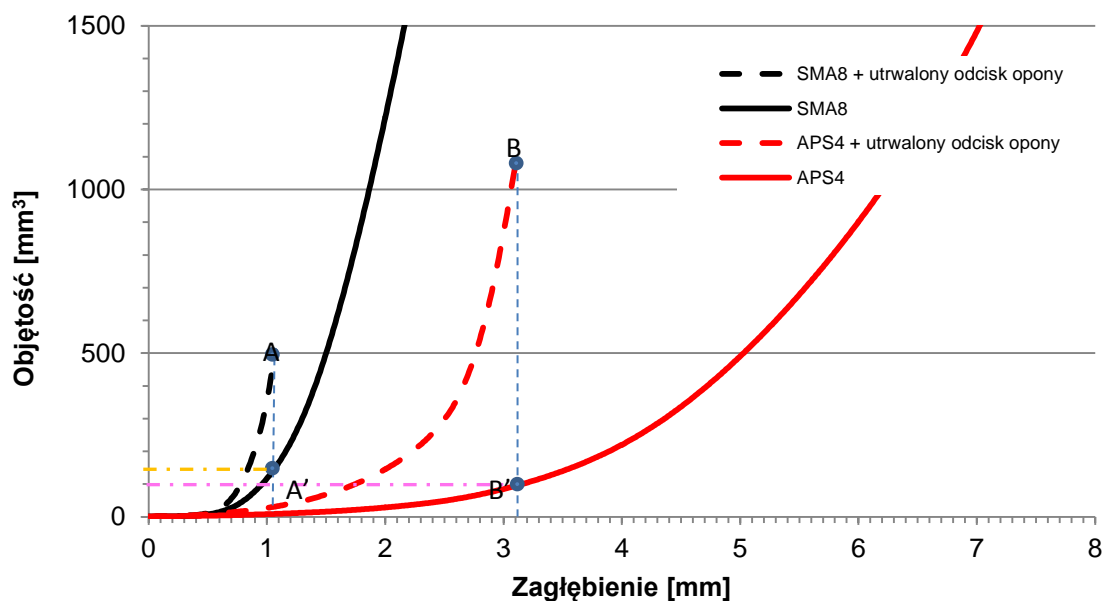
do określenia objętości elementów tekstury nawierzchni, które to odkształcenie wywołały. Dzięki metodzie utrwalania odcisku opony na nawierzchni można uzyskać informację jak głęboko wnikają nierówności nawierzchni w oponę (Rys. 61, wielkość h). Znając tę głębokość można wyznaczyć objętość elementów tekstury współpracujących z oponą na podstawie jej cyfrowego zapisu.

Analiza powyższych zjawisk przedstawiona została w publikacji autorstwa Ejsmont, Sommer [82] w roku 2021. Na jej podstawie Morten L. Larsen z Roskilde University, Denmark w swojej pracy doktorskiej (obronionej w kwietniu 2022 r.) opracował swój własny deskryptor tekstury nazywany Peak Fraction, który jest znacznie uproszczoną wersją deskryptora będącego wynikiem niniejszej pracy. Peak Fraction może być zastosowany jedynie do nawierzchni, w których nie występują wysokie i ostro zakończone wierzchołki nierówności.

Poddano analizie porównawczej próbki nawierzchni oraz wykonane na nich odciski dla replik dwóch rzeczywistych nawierzchni SMA8 i APS4. Ze względu na czasochłonność procesu skanowania ograniczono analizowaną powierzchnię do wymiarów 50 x 50 mm. Na Rys. 62 zestawiono przebiegi przyrostu objętości nierówności nawierzchni w funkcji zagłębienia. Oś pozioma oznacza wielkość zagłębienia nierówności tekstury w oponę patrząc od strony ich szczytów. Zero na tej osi oznacza punkt styku opony ze szczytem nierówności. Oś pionowa oznacza sumaryczną objętość elementów tekstury nawierzchni zanurzonych w oponę dla danego zagłębienia. Linie ciągłe oznaczają przyrost objętości nierówności tekstury wyznaczonych dla nawierzchni bez odcisku opony. Linie przerywane oznaczają przyrost objętości nierówności nawierzchni wraz z odciskiem opony. To oznacza, że linie przerywane uwzględniają również objętości G pokazane na Rys. 61. Na wykresie przedstawionym na Rys. 62 punkt A oznacza, z jednej strony maksymalną głębokość zanurzenia nierówności nawierzchni SMA8 w oponę (około 1,05 mm), a z drugiej strony objętość tych elementów wraz z objętością G (około 550 mm³). Analogicznie przeprowadzono analizę punktu B dla nawierzchni APS4 (maksymalna głębokość wynosi około 3,1 mm a objętość około 1100 mm³). Aby wyznaczyć objętość samych elementów nawierzchni zanurzonych w oponę należy punkty A i B rzutować na linie ciągłe uzyskując, odpowiednio, punkty A' i B'. Dzięki temu możliwe jest ustalenie objętości samych elementów nawierzchni. W przypadku nawierzchni SMA8 dla punktu A' z osi pionowej można odczytać objętość, która wynosi około 150 mm³, a przypadku nawierzchni APS4 dla punktu B' – około 100 mm³. Analizując powyższy przykład można zauważyć, że objętości elementów nawierzchni zanurzonych w oponę są znacznie mniejsze od tych wyznaczonych na podstawie odcisków opony.



Rys. 61 Przekrój utrwalonego odcisku opony na nawierzchni z wypukłymi stożkami: a) przekrój w płaszczyźnie toczenia się opony, b) powiększony fragment przekroju ukazujący zjawisko dodatkowego otulania nierówności przez silikon odlewniczy powyżej powierzchni styku opony z nawierzchnią (niebieskie kółko), c) schemat demonstrujący zjawisko dodatkowego otulania nierówności nawierzchni poprzez silikon odlewniczy powyżej płaszczyzny odniesienia 1- opona, 2- płaszczyzna odniesienia- jest to płaszczyzna położona stycznie do najniższych punktów bieżnika opony, 3- silikon odlewniczy, 4- nawierzchnia z agresywną teksturą, h -maksymalna głębokość wnikania nierówności nawierzchni w oponę, H - maksymalna wysokość nierówności tekstury, G - przestrzeń utworzona na skutek odkształcenia bieżnika opony w wyniku oddziaływania nierówności nawierzchni.



Rys. 62 Zależność pomiędzy objętością elementów tekstury a głębokością wnikania w oponę dla replik rzeczywistych nawierzchni SMA8 oraz APS4. Linie przerywane oznaczają przyrost objętości nierówności nawierzchni wraz z dodatkową objętością silikonu odlewniczego. Objętości te zostały wyznaczone dla utrwalonego odcisku opony na nawierzchni. Linie ciągłe oznaczają przyrost objętości nierówności nawierzchni. Objętości te zostały wyznaczone dla nawierzchni bez utrwalonego odcisku.

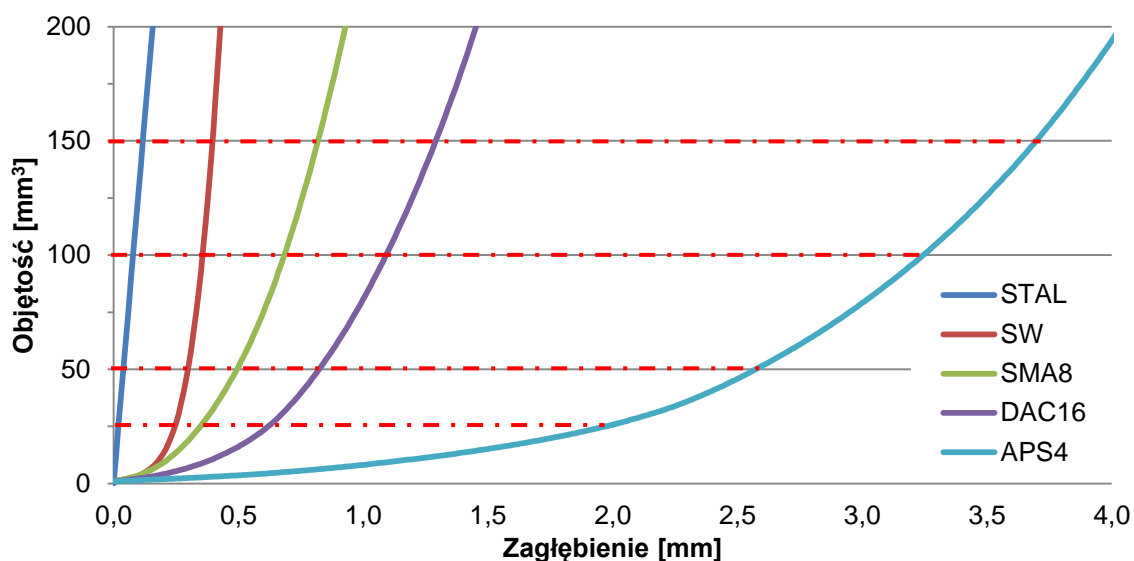
Analizując wyniki zaprezentowane na Rys. 62 można zauważyć, że objętość elementów tekstury nawierzchni jest zbliżona do 100 mm^3 , niezależnie od wysokości tych elementów ani agresywności nawierzchni. Można zatem przypuszczać, że istnieje związek pomiędzy wybraną stałą objętością a zagłębieniem nierówności w oponę, skorelowana ze współczynnikiem oporu toczenia analizowanych nawierzchni. Celem udowodnienia takich założeń poddano analizie cztery repliki rzeczywistych nawierzchni oraz powierzchnię stalową. W Tab. 8 zestawiono współczynniki oporu toczenia (C_{RR}) dla wybranych nawierzchni. Wyniki te uzyskano po przebadaniu wzorcowych opon SRTT i AAV4 na maszynie bieżnej z bębniem o średnicy 2,0 m. Badania prowadzono w warunkach zgodnych z metodyką TUG opracowaną na Politechnice Gdańskiej [76]. Zgodnie z opracowaną procedurą badania przeprowadzono w temperaturze otoczenia wynoszącej 25°C , obciążeniu koła wynoszącym 4000 N oraz dla regulowanego ciśnienia wewnątrz opony wynoszącym 210 kPa i prędkości 80 km/h.

Tab. 8 Zestawienie współczynnika oporu toczenia dla pięciu wybranych nawierzchni i dwóch opon.

Opona	Nawierzchnie				
	Stal	SW	SMA8	DAC16	APS4
SRTT	0,0071	0,0076	0,0083	0,0087	0,0136
AAV4	0,0105	0,0107	0,0109	0,0119	0,0153

Do dalszej analizy przyjęto cztery stałe objętości elementów tekstury nawierzchni zanurzonych w oponę: 25, 50, 100 i 150 mm^3 . Przy wyborze tych objętości kierowano się rezultatami uzyskanymi na nawierzchniach SMA8 oraz APS4 (Rys. 62). Dla wybranych objętości wyznaczono zagłębienie

elementów tekstury w oponę dla pięciu analizowanych nawierzchni (Rys. 63 i Tab. 9). W celu ustalenia najkorzystniejszej stałej objętości przeprowadzono analizę ich wpływu na jakość korelacji zagłębienia ze współczynnikiem oporu toczenia.

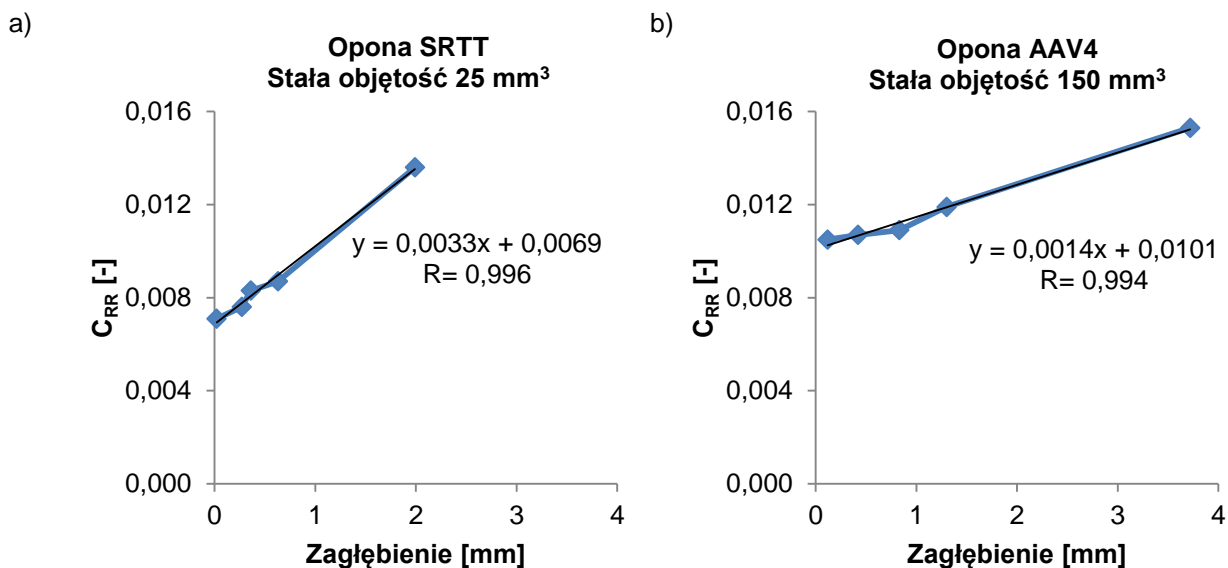


Rys. 63 Zależność pomiędzy objętością elementów tekstury a głębokością wnikania w oponę dla pięciu nawierzchni. Liniami kropkowanymi oznaczono wybrane objętości elementów tekstury dla których wyznaczono wielkości zagłębień na poszczególnych nawierzchniach.

Tab. 9 Zestawienie zagłębień elementów tekstury w oponę dla pięciu wybranych nawierzchni w funkcji czterech wybranych stałych objętości.

Objętość zanurzonych elementów nawierzchni w oponę [mm ³]	Nawierzchnie				
	Stal	SW	SMA8	DAC16	APS4
25	0,02	0,27	0,36	0,63	1,99
50	0,04	0,32	0,50	0,83	2,60
100	0,08	0,38	0,70	1,10	3,27
150	0,12	0,42	0,83	1,30	3,72

Na Rys. 64 przedstawiono przykładowe zależności współczynnika oporu toczenia opon od zagłębienia dla dwóch wybranych stałych objętości. Z lewej strony przedstawiono rezultat dla opony SRTT i stałej objętości 25 mm³, gdzie uzyskano współczynnik korelacji liniowej R= 0,996. Z prawej strony przedstawiono zależność dla opony AAV4 i stałej objętości 150 mm³, gdzie uzyskano współczynnik korelacji liniowej R= 0,994. Wszystkie uzyskane współczynniki korelacji liniowej dla dwóch opon SRTT i AAV4 oraz czterech stałych objętości: 25, 50, 100 oraz 150 mm³ zestawiono w Tab. 10.

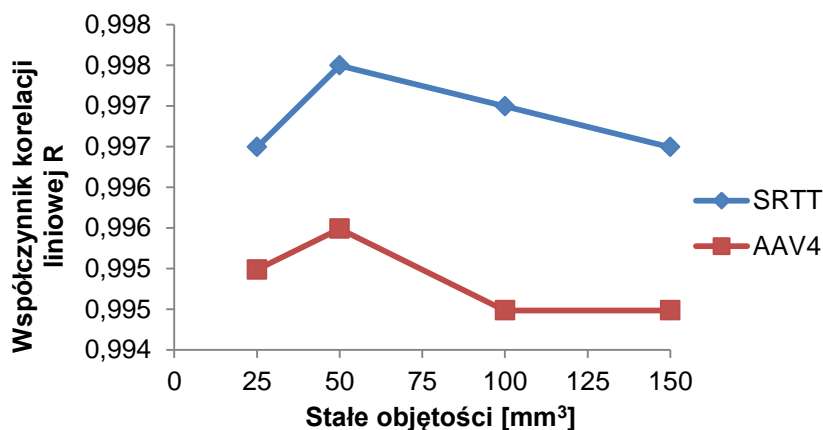


Rys. 64 Zależności współczynnika oporu toczenia wyznaczone dla pięciu analizowanych nawierzchni w funkcji zagłębienia w odniesieniu do stałych objętości: a) opona SRTT. Zależność uzyskana dla stałej objętości 25 mm³, b) opona AAV4. Zależność uzyskana dla stałej objętości 150 mm³.

Tab. 10 Zestawienie współczynników korelacji liniowej R dla dwóch opon oraz czterech stałych objętości. Współczynnik ten został wyznaczony dla pięciu analizowanych nawierzchni.

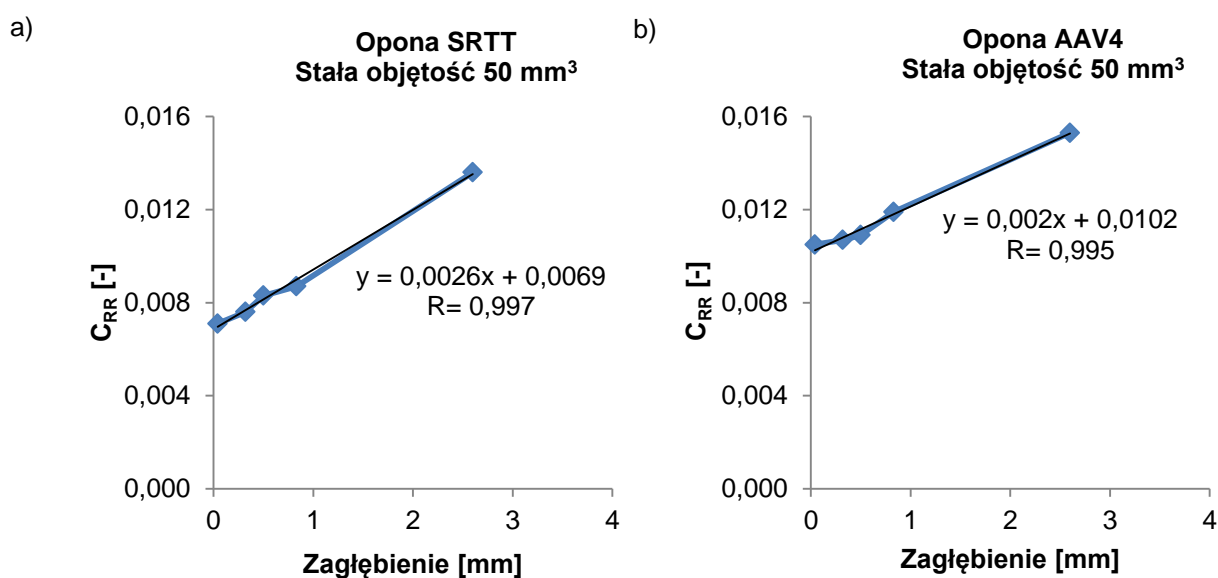
Opona	Stale objętości [mm ³]			
	25	50	100	150
SRTT	0,996	0,997	0,997	0,996
AAV4	0,995	0,995	0,994	0,994

W celu przeanalizowania uzyskanych rezultatów zestawionych w Tab. 10 opracowano zależności przedstawione na Rys. 65. Można zauważyć, że dla stałej objętości o wartości 50 mm³ uzyskuje najlepsze współczynniki korelacji liniowej dla obu opon SRTT i AAV4. Tę właśnie objętość wybrano do dalszych analiz.



Rys. 65 Zależność współczynnika korelacji liniowej R w funkcji stałych objętości.

Na Rys. 66 zestawiono współczynniki oporu toczenia opon wzorcowych SRTT i AAV4 w funkcji zagłębienia dla stałej objętości 50 mm^3 . Dla obydwu opon uzyskano bardzo wysoki współczynnik korelacji liniowej, dla pierwszej opony wyniósł on $R= 0,997$, a dla drugiej $R= 0,995$. Oznacza to, że zagłębienie dla stałej objętości 50 mm^3 może być dobrym parametrem opisującym jakość tekstury nawierzchni w kontekście jej oporu toczenia wyznaczonego oponami wzorcowymi. Autor rozprawy proponuje, aby parametr ten nazwać **Descriptor of Pavement Texture** (DPT, w j. polskim: deskryptor tekstury nawierzchni). W celu jednoznacznego uściślenia parametru DPT niezbędne jest stosowanie indeksu dolnego, który będzie oznaczał przyjętą stałą objętość do wyznaczenia tego parametru. W tym przypadku parametr dla stałej objętości wynoszącej 50 mm^3 będzie oznaczany DPT_{50} , a jego mianem będzie jednostka długości wyrażonej w [mm]. Jednakże metoda wymaga walidacji, ponieważ DPT_{50} wyznaczono tylko dla dwóch opon i pięciu nawierzchni.



Rys. 66 Korelacja współczynnika oporu toczenia opon wzorcowych w funkcji zagłębienia dla stałej objętości wynoszącej 50 mm^3 : a) opona SRTT, b) opona AAV4.

Wszystkie dotychczas podjęte prace badawcze w ramach niniejszego opracowania doprowadziły do umożliwienia powiązania współczynnika oporu toczenia (C_{RR}) wzorcowych opon z deskryptorem tekstury nawierzchni (DPT_{50}) - zależność 17. Funkcja opisująca tę zależność jest funkcją liniową (wzór 18). Analizując powyższe zestawienia (Rys. 66) stwierdzono, że należy opracowywać funkcje liniowe niezależnie dla każdej opony. W Tab. 11 przedstawiono współczynniki funkcji liniowej opisującej zależność pomiędzy współczynnikiem oporu toczenia a deskryptorem tekstury nawierzchni (DPT_{50}).

Dzięki opracowanej metodyce możliwe jest opracowywanie deskryptorów nawierzchni oraz korelacji liniowej współczynnika oporu toczenia C_{RR} w funkcji wskaźnika DPT dla różnych opon.

$$C_{RR} = f(DPT_{50}) \quad (17)$$

gdzie: C_{RR} - współczynnik oporu toczenia, DPT_{50} - deskryptor tekstury nawierzchni dla stałej objętości wynoszącej 50 mm³.

$$f(DPT_{50}) = a \cdot DPT_{50} + b \quad (18)$$

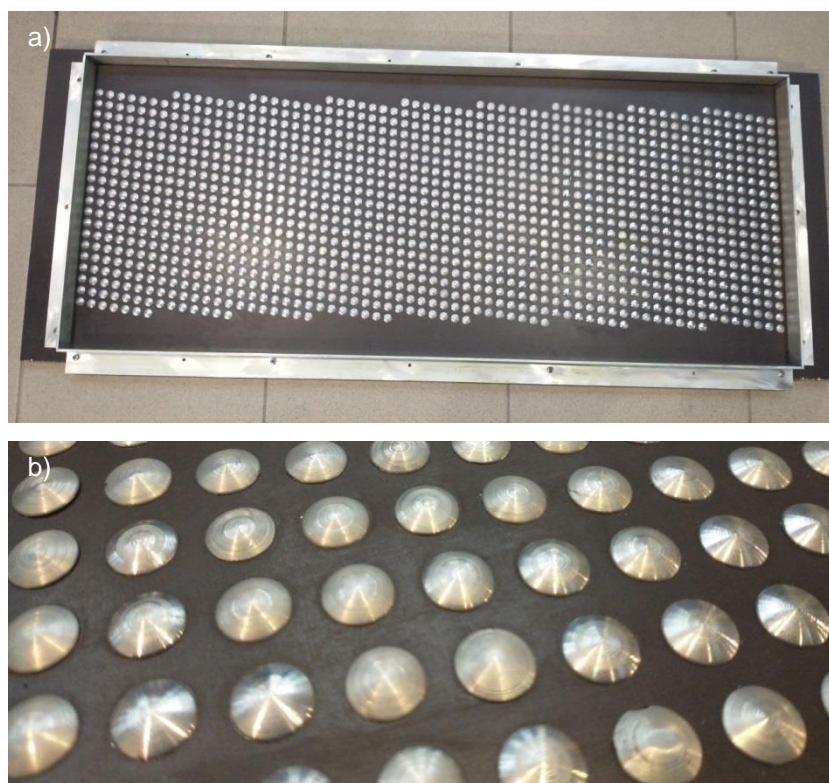
gdzie: DPT_{50} - deskryptor tekstury nawierzchni dla stałej objętości wynoszącej 50 mm³, **a**, **b**- współczynniki funkcji liniowej.

Tab. 11 Zestawienie współczynników funkcji liniowej.

Opony	Współczynniki funkcji liniowej	
	a	b
SRTT	$2,5666 \cdot 10^{-3}$	$6,8579 \cdot 10^{-3}$
AAV4	$1,9581 \cdot 10^{-3}$	$1,0180 \cdot 10^{-2}$

16. WZORCOWA NAWIERZCHNIA DO BADAŃ NORMALIZACYJNYCH

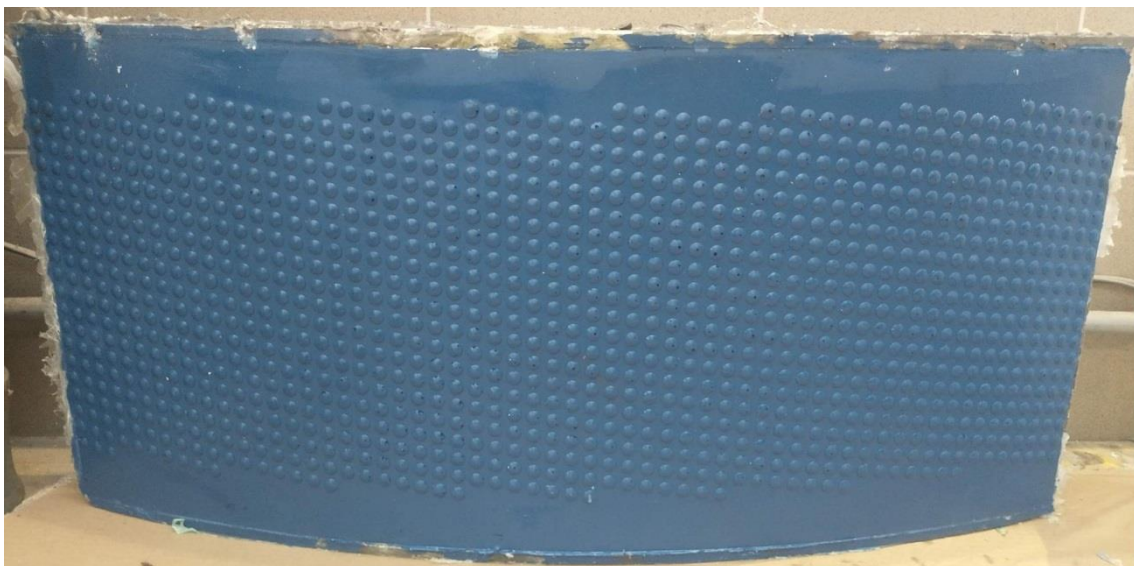
W oparciu o zdobyte doświadczenie podczas tworzenia pracy doktorskiej opracowano wzorcową nawierzchnię referencyjną do pokrycia bębna maszyny bieżnej. Idea referencyjnej nawierzchni wzorcowej polega na tym, aby prowadzone na niej badania oporu toczenia i hałasu dawały zbliżone rezultaty do wyników uzyskiwanych na nawierzchni drogowej SMA8. Dzięki takiej wzorcowej nawierzchni będzie można prowadzić normatywne badania bardziej przypominające warunki rzeczywiste. Ze względu na prostą geometrię takie nawierzchnie będą stosunkowo łatwe do wykonania i pokrycia bębnow maszyn bieżnych. Obecnie czołowi producenci opon na świecie do badań opon używają wyłącznie stalowych bębnow maszyn bieżnych. W ramach projektu ELANORE powstaje wzorcowa nawierzchnia referencyjna, która zostanie poddana badaniom weryfikacyjnym. Stworzony model nawierzchni oparto o proste bryły geometryczne o ściśle określonych wymiarach i regularnym rozkładzie na powierzchni. Każdy wypukły element nawierzchni ma średnicę 10 mm oraz wysokość 1,8 mm. Na Rys. 67 przedstawiono płaską matrycę z odpowiednio rozmieszczonymi wypukłymi elementami o kształcie wycinka sfery. Na tej matrycy wykonano silikonowy odlew, który odpowiednio wbudowano w formę do wykonania segmentu nawierzchni referencyjnej (Rys. 68). Na Rys. 69 przedstawiono wykonaną sekcję wzorcowej nawierzchni referencyjnej. Po wykonaniu ośmiu takich sekcji zostały one zamontowane na bębnie maszyny bieżnej (Rys. 70). Technologia wytwarzania tego typu nawierzchni została szczegółowo przedstawiona w Załączniku I.



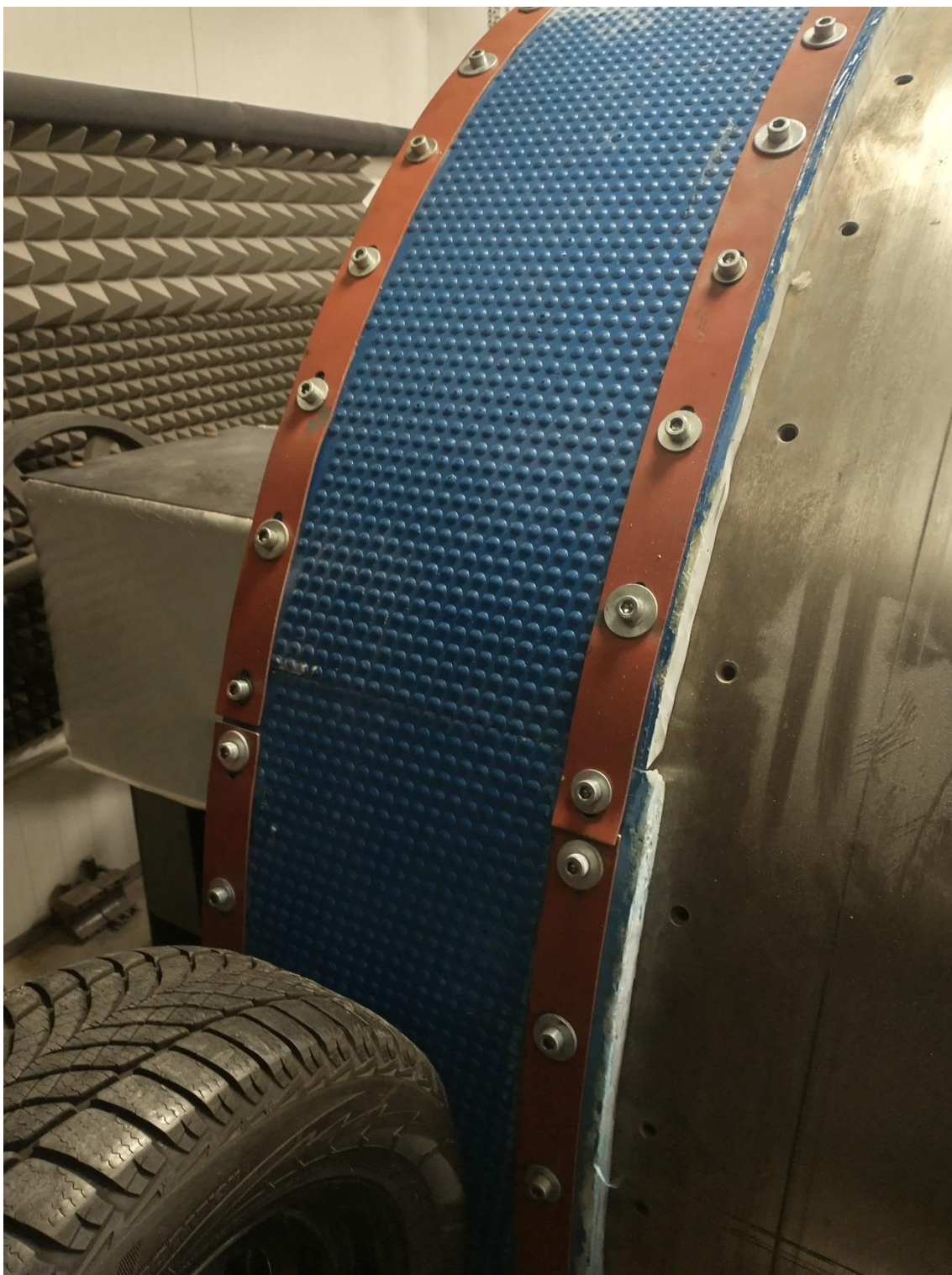
Rys. 67 Matryca do wykonania formy wzorcowej nawierzchni referencyjnej: a) cała matryca, b) powiększony fragment matrycy.



Rys. 68 Forma do wykonania wzorcowej nawierzchni referencyjnej: a) cała forma, b) powiększony fragment formy.



Rys. 69 Jedna z sekcji wzorcowej nawierzchni referencyjnej.



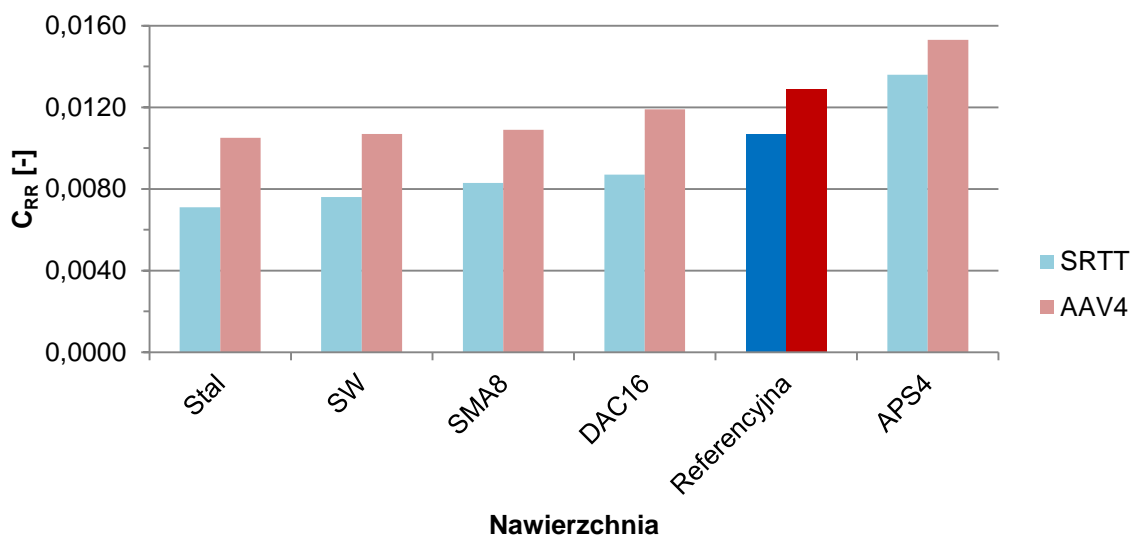
Rys. 70 Nawierzchnia referencyjna po montażu na bębnie maszyny bieżnej.

Na wykonanej nawierzchni referencyjnej przeprowadzono badania oporu toczenia dla opon SRTT i AAV4 zgodnie z metodyką TUG. Uzyskane rezultaty przedstawiono w Tab. 12. W oparciu o wyniki przedstawione w Tab. 8 i Tab. 12 opracowano wykres słupkowy przedstawiony na Rys. 71. Analizując wykres można zauważyć, że współczynniki oporu toczenia dla obydwu opon na nawierzchni referencyjnej uplasowały się pomiędzy nawierzchnią DAC16 oraz APS4. Następnie przebadano sześć

kolejnych opon przedstawionych w Tab. 13 na czterech nawierzchniach. Uzyskane rezultaty przedstawiono na Rys. 72. Z tego wynika, że współczynnik oporu toczenia opracowanej nawierzchni referencyjnej uplasował się pomiędzy nawierzchnią SMA8 a APS4 dla wszystkich sześciu opon. Jego wartość jest zbliżona do współczynnika oporu toczenia dla nawierzchni SMA8. Uzyskane wyniki badań potwierdzają słuszność idei, że nawierzchnia złożona z regularnych elementów geometrycznych może być porównywalna z rzeczywistymi nawierzchniami w aspekcie oporu toczenia i może być wykorzystana do pokrywania powierzchni bębnow maszyn bieżnych. Opracowana tekstura składająca się z prostych i regularnych kształtów umożliwia wytwarzanie nawierzchni o powtarzalnych właściwościach co stanowi przesłankę do tego, aby mogły być przeznaczone do badań normalizacyjnych prowadzonych w ośrodkach badawczych. Obecnie planowane jest wykonanie kolejnych prototypów nawierzchni referencyjnej o obniżonym współczynniku oporu toczenia względem obecnie wytworzonych.

Tab. 12 Zestawienie współczynnika oporu toczenia dla nawierzchni referencyjnej i dwóch opon.

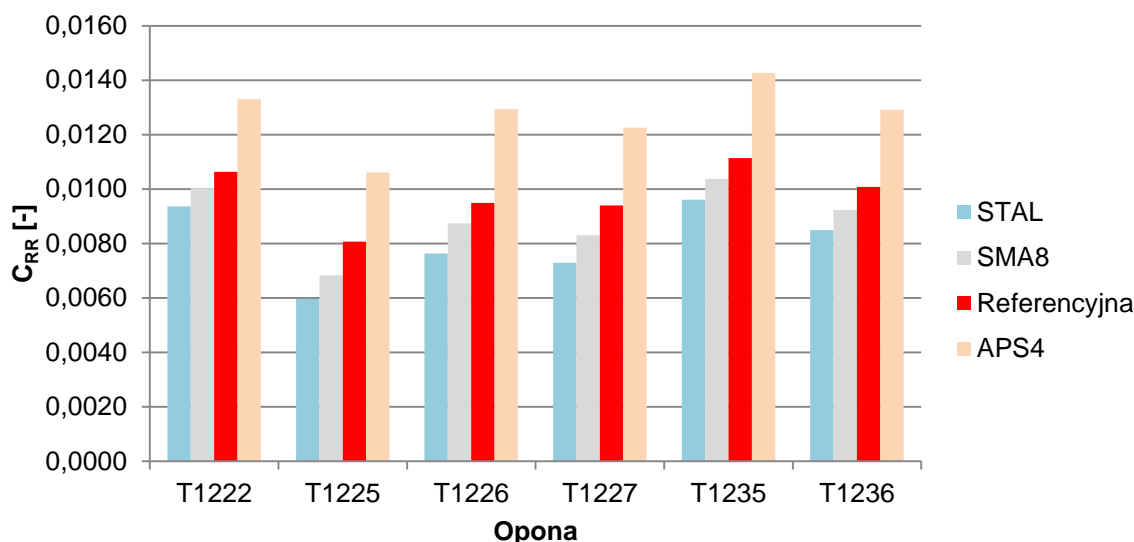
Opona	C_{RR} [-]
SRTT	0,0107
AAV4	0,0129



Rys. 71 Współczynniki oporu toczenia uzyskane dla dwóch opon SRTT i AAV4 na sześciu nawierzchniach łącznie z referencyjną.

Tab. 13 Zestawienie sześciu opon wybranych do badań porównawczych oporu toczenia.

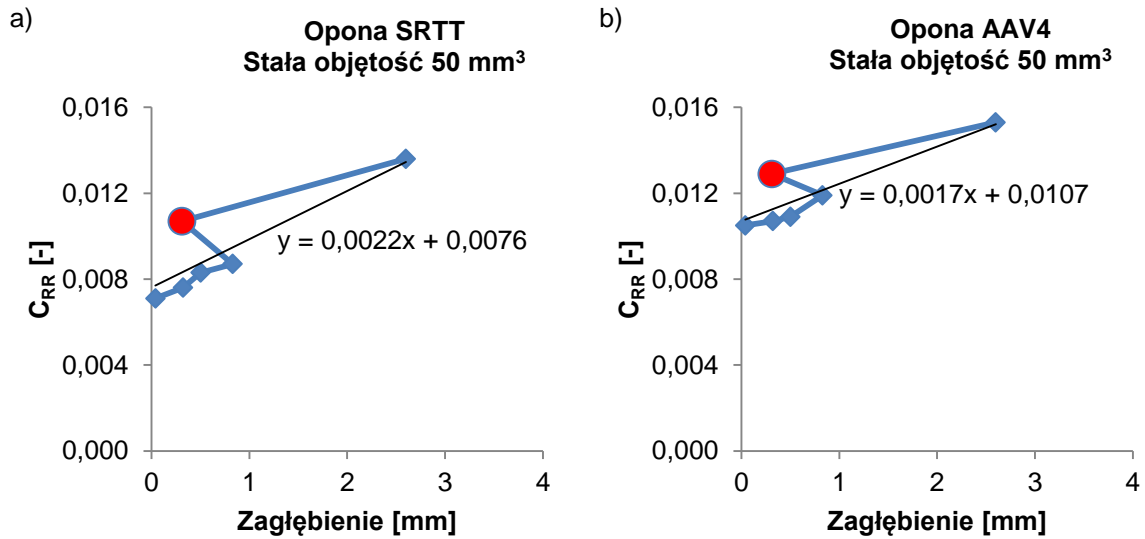
Symbol opony	T1222	T1225	T1226	T1227	T1235	T1236
Producent	Bridgestone	Goodyear	Michelin	Michelin	Falken	Nankang
Bieżnik	LM32	Efficientgrip Performance	CrossClimate+	Primacy 4	HS 449	SV-3
Rozmiar	205/55R16	205/55R16	205/55R16	205/55R16	205/55R16	205/55R16



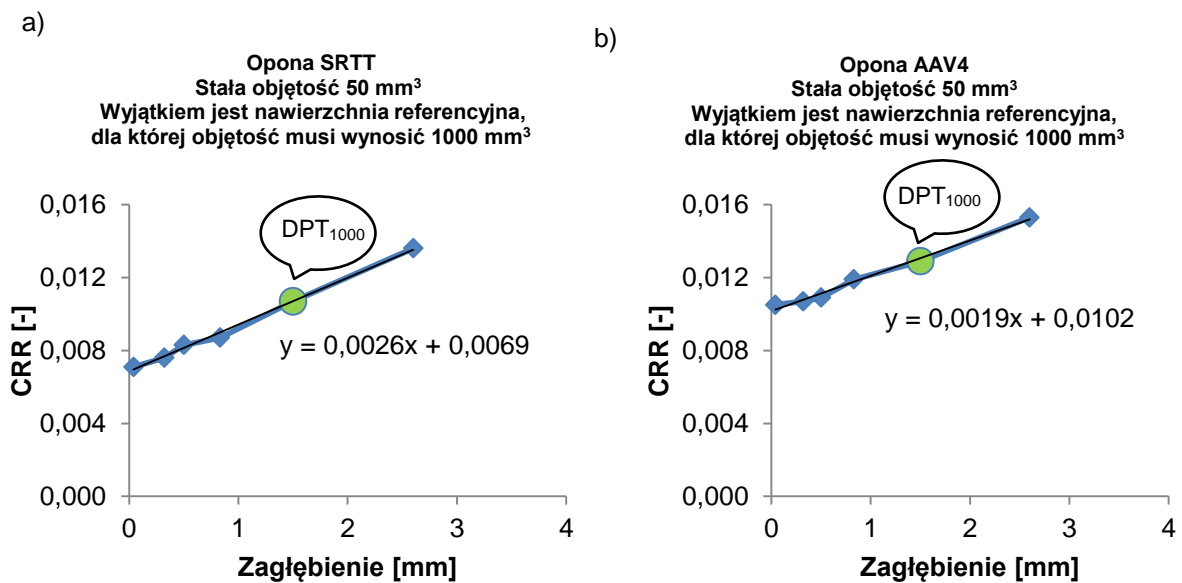
Rys. 72 Współczynniki oporu toczenia uzyskane dla sześciu na czterech nawierzchniach.

Zgodnie z proponowaną metodyką dla nawierzchni referencyjnej wyznaczono zagłębienie dla stałej objętości 50 mm³ (DPT₅₀), wynoszące 0,31 mm. Następnie poddano analizie korelację współczynnika oporu toczenia z parametrem DPT₅₀ dla sześciu nawierzchni (w tym referencyjnej) i dwóch opon. Uzyskane rezultaty przedstawiono na Rys. 73. Jednoznacznie można stwierdzić, że nawierzchnia referencyjna (oznaczona czerwonym punktem) nie koreluje się z replikami nawierzchni rzeczywistych. Oznacza to, że proponowana metodyka nie może być stosowana do nawierzchni złożonych z powtarzalnych elementów geometrycznych. Wartość parametru DPT₅₀ dla tego typu nawierzchni jest zdecydowanie za mała. Jeżeli wartość parametru DPT₅₀ dla nawierzchni referencyjnej zostanie zwiększona z 0,31 mm do 1,50 mm to zostanie uzyskana prawidłowa korelacja ze współczynnikiem oporu toczenia. Tak uzyskaną korelację dla dwóch opon przedstawiono na Rys. 74. Dla rozważanej nawierzchni referencyjnej zagłębienie 1,50 mm w oponę odpowiada stałej objętości wynoszącej 1000 mm³. W tym przypadku deskryptor tekstury nawierzchni powinien być oznaczany jako DPT₁₀₀₀. Należy podkreślić, że dla tego samego parametru DPT₁₀₀₀ opór toczenia dla nawierzchni referencyjnej dobrze koreluje się niezależnie dla dwóch opon SRTT i AAV4. Uzyskane równania korelacji liniowej dla sześciu nawierzchni i dwóch opon (Rys. 74) są zgodne z równaniami uzyskanymi dla pięciu nawierzchni przedstawionych na Rys. 66. Po wykonaniu dwóch kolejnych typów

nawierzchni referencyjnych o innych współczynnikach oporu toczenia możliwe będzie zweryfikowanie metodyki dla deskryptora DPT_{1000} odnoszącego się do nawierzchni geometrycznych.



Rys. 73 Korelacja współczynnika oporu toczenia opon wzorcowych w funkcji zagłębienia dla stałej objętości wynoszącej 50 mm³: a) opona SRTT, b) opona AAV4. Zestawiono 6 nawierzchni z **Rys. 71**. Czerwony punkt oznacza nawierzchnię referencyjną.



Rys. 74 Korelacja współczynnika oporu toczenia opon wzorcowych w funkcji zagłębienia dla stałej objętości wynoszącej 50 mm³ z wyjątkiem nawierzchni referencyjnej: a) opona SRTT, b) opona AAV4. Zielony punkt oznacza nawierzchnię referencyjną.

17. WNIOSKI

1. Opracowano wskaźnik liczbowy DPT_{50} opisujący wpływ tekstury nawierzchni na opór toczenia opon lepiej niż dotychczas stosowany parametr MPD (Średnia Głębokość Profilu). Przy stałej objętości zagłębionych elementów tekstury w oponę ich zanurzenie jest uzależnione od rodzaju nawierzchni drogowej. Wykazaną zależność wykorzystano jako matematyczny deskryptor tekstury nawierzchni do wyznaczania oporu toczenia.
2. Istnienie zjawiska envelopingu wykazano utrwalając odciski opony na nawierzchniach badawczych. Dzięki tej metodzie uzyskano informację dotyczącą tego jak głęboko wnikają nierówności nawierzchni w oponę. Znając tę głębokość ustalono objętości elementów tekstury współpracujących z oponą, które są odpowiedzialne za opór toczenia.
3. Deskryptor tekstury nawierzchni DPT_{50} opisuje funkcja liniowa. Parametry tej funkcji są zależne od właściwości opony. W przypadku pomiarów oporu toczenia nawierzchni drogowych opór ten typowo wyznacza się tylko trzema oponami wzorcowymi.
4. Do opracowania deskryptora tekstury wykorzystywano skany powierzchni o wymiarach 50 x 50 mm. W przypadku agresywnych tekstur przy tak małej powierzchni powtarzalność wyników jest zbyt mała, dlatego należy uzupełnić wyniki o badania dla zwiększonego obszaru analizowanej nawierzchni drogowej.
5. Zaproponowana metoda wyznaczania wskaźnika DPT_{50} nie może być stosowana do opisu nawierzchni o znacznej elastyczności. Na podstawie zastosowanych w niniejszej pracy metod analitycznych nie można jednoznacznie rozdzielić wielkości ugięcia nawierzchni od zagłębienia jej elementów w bieżnik.
6. W przypadku metody dotyczącej wyznaczania głębokości penetracji elementów tekstury, siły wymuszające były zbyt małe. Skutkowało to tym, że czasy wnikania penetratora w bieżnik były zbyt długie.

18. DALSZE PLANY BADAWCZE:

1. W przyszłości będą prowadzone badania kolejnych nawierzchni, ich replik oraz następnych opon, ponieważ opracowana metoda odnosi się do 2 opon wzorcowych i 5 nawierzchni.
2. Planowane są badania kolejnych opon, które znacząco różnią się współczynnikiem oporu toczenia. Umożliwi to weryfikację zaproponowanej metody w zakresie niskich oraz wysokich współczynników oporu toczenia.
3. W celu zwiększenia dokładności metody wyznaczania DPT_{50} należy powiększyć obszar skanowanej powierzchni z 50 x 50 mm do 200 x 200 mm. Być może okaże się, że na skutek przeprowadzonych dalszych badań będzie konieczność zmiany wartości stałej objętości determinującej wskaźnik DPT.
4. Planowane jest wykonanie kolejnych wersji nawierzchni złożonych z elementów geometrycznych przeznaczonych do pokrywania bębna maszyny bieżnej. Zostanie na nich przeprowadzona weryfikacja deskryptora DPT_{1000} .
5. Autor zamierza zoptymalizować metodę wytwarzania replik nawierzchni na bęben maszyny bieżnej przy wykorzystaniu technologii druku 3D po uzyskaniu niezbędnych środków na zakup laserowego skanera 3D, aby przyspieszyć proces skanowania próbek nawierzchni. Przy dzisiejszej technologii urządzenia takie uzyskują prędkości skanowania wynoszące około 500 000 próbek na sekundę. To oznacza, że przy powierzchni 200 x 200 mm, która jest porównywalna ze śladem styku opony z nawierzchnią, uzyska się rozdzielczość 3,5 punktu na milimetr. Stąd wniosek, że w ciągu jednej sekundy można byłoby uzyskać skan powierzchni porównywalnej do śladu styku opony z nawierzchnią z dokładnością do 0,1 mm. Dzięki pozyskanemu skanerowi 3D będzie możliwe rozbudowanie cyfrowej bazy wzorców nawierzchni drogowych. Baza taka umożliwi wykonywanie dokładnych replik nawierzchni, które będą montowane na bębnie maszyny bieżnej.

19. SPIS RYSUNKÓW:

Rys. 1	Opór wzniesienia dla drogi nachylonej pod kątem α	12
Rys. 2	Układ sił działających na koło toczące się pod działaniem siły P: a) siły działające na oponę, b) rozkład nacisków w śladzie styku opona- nawierzchnia. Opracowano na podstawie [6].....	14
Rys. 3	Maszyny bieżne do badania hałasu i oporu toczenia opon i nawierzchni o średnicy bębna równej: a) 1,708 m, b) 2,050 m.....	21
Rys. 4	Nawierzchnie przyklejone do stalowego bębna o średnicy 1,708 m: a) APS-4, b) poroelastyczna.....	22
Rys. 5	Nawierzchnie, w które wyposażone jest stalowy bęben o średnicy 2,050 m: a) stalowa powierzchnia, b) naklejona nawierzchnia SW-80, c) przykręcona replika nawierzchni SMA8.	22
Rys. 6	Przyczepa R ² Mk.2. do badania oporu toczenia opon samochodowych.....	24
Rys. 7	Metoda pomiaru współczynnika C_{RR} przy wykorzystaniu odchylanego wahacza pomiarowego, gdzie: F_r - siła oporu toczenia, β - kąt o jaki siła oporu toczenia oddziałująca na koło badane wychyla wahacz pionowy z położenia równowagi, F_z - siła normalna do nawierzchni, która obciąża koło badane [68].	24
Rys. 8	Ustrój pomiarowy przyczepy pomiarowej R ² Mk.2.....	25
Rys. 9	Schemat funkcjonalny ustroju pomiarowego przyczepy badawczej R ² Mk.2., gdzie: m_c - masa oddziałująca na koło, m_k - masa koła badanego, m_w - masa wahacza pomiarowego, I_k - moment bezwładności koła badanego [68].....	25
Rys. 10	Uproszczony schemat poszczególnych zakresów tekstury nawierzchni drogowej [45].....	28
Rys. 11	Zakresy tekstury oraz jej wpływ na współpracę opony z nawierzchnią badawczą. Opracowano na podstawie [46].	28
Rys. 12	Współczynniki oporu toczenia uśrednione dla poszczególnych grup opon. Opracowano na podstawie [3].....	29
Rys. 13	Zasada określenia wskaźnika MPD [52].	30
Rys. 14	Pomiar tekstury nawierzchni metodą objętościową [46].....	31
Rys. 15	Pomiar tekstury nawierzchni metodą wypływu cieczy [46].....	32
Rys. 16	Pomiar tekstury nawierzchni profilometrem laserowym [46].....	33
Rys. 17	Metody pomiaru tekstury nawierzchni profilometrem laserowym: a) stacjonarnym, b) mobilnym [46].....	33
Rys. 18	Zachowanie opon na przeszkodzie o wielkości mniejszej niż powierzchnia styku nawierzchni z oponą: a) przejazd opony przez przeszkodę, b) zmiany siły pionowej, wzdłużnej oraz prędkości wirowania koła [65].....	35
Rys. 19	Współpraca gumy bieżnika opony z nawierzchnią. Rysunek na górze przedstawia częściowe otulanie elementów nawierzchni przez gumę bieżnika, natomiast dolny pełne [64].....	36
Rys. 20	Schemat ustroju pomiarowego do wyznaczania sztywności dynamicznej bieżnika opony. 1. Opona, 2. Penetrator, 3. Płyta najazdowa, 4. Powierzchnia odniesienia, 5. Czujnik pomiaru siły, 6. Siłownik pneumatyczny, 7. Wiązka lasera, 8. Czujnik laserowy do pomiaru przemieszczenia. Rysunek poglądowy, nie jest zachowana proporcja wymiarowa.....	38



Rys. 21 Stanowisko do pomiaru sztywności dynamicznej bieżnika opony: a) płyta najazdowa z umieszczonym układem pomiarowym, b) kompletny układ pomiarowy wraz z elementami sterującymi, c) ustrój pomiarowy z zamontowaną płytą najazdową.	38
Rys. 22 Interfejs graficzny programu pomiarowego.....	39
Rys. 23 Koło badane umieszczone na płycie stanowiska pomiarowego.....	40
Rys. 24 Penetratory o regularnych kształtach: a) z wypukłymi sferami o średnicy kolejno od lewej- 6, 8, 12 oraz 16 mm, b) o kształcie wypukłego ostrosłupa o podstawie kwadratu 16 x 16 mm i wysokościach kolejno od lewej- 4 i 9 mm.	40
Rys. 25 Penetratory odpowiadające rzeczywistym nawierzchniom: a) APS4, b) SMA8, c) SMA11, d) na górze- nawierzchnia poroelastyczna PERS, na dole- sztywna replika nawierzchni PERS.	41
Rys. 26 Rezultaty uzyskane w wyniku badania przy użyciu penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm. Ciśnienie pompowania opony wynosiło 210 kPa. Siły wymuszające wynosiły: a) 40 N, b) 121 N, c) 201 N.	43
Rys. 27 Powiększony fragment przebiegu zależności przedstawionej na Rys. 26c.	44
Rys. 28 Wpływ ciśnienia pompowania opony na szybkość zagłębiania się penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm. Siły wymuszające wynosiły: a) 40 N, b) 121 N, c) 201 N. Z prawej strony przedstawiono pierwsze 10 ms w formie powiększonej odpowiadające przebiegom prezentowanym na wykresach z lewej strony.	46
Rys. 29 Wpływ zanieczyszczenia bieżnika na zagłębienie penetratora z wypukłą sferą o średnicy 8 mm. Ciśnienie pompowania 270 kPa. Siła wymuszająca penetrację: a) 40 N, b) 121 N, c) 201 N.	48
Rys. 30 Penetratory o regularnych kształtach oraz z fragmentami rzeczywistych nawierzchni: a) penetratory o kształcie wypukłej sfery o średnicy: od lewej 6, 8, 12 i 16 mm, następnie penetratory o kształcie wypukłego ostrosłupa o podstawie kwadratu 16 x 16 mm i wysokościach: 4 i 9 mm, b) penetratory z fragmentem nawierzchni PERS o tej samej teksturze, ale różnej sztywności; 2 pierwsze z lewej- sztywna replika nawierzchni poroelastycznej, 2 kolejne- fragment rzeczywistej, poroelastycznej nawierzchni, c) penetratory z fragmentem rzeczywistej nawierzchni: 2 pierwsze z lewej- replika SMA8, 2 następnie- SMA11, d) penetratory z fragmentem rzeczywistej nawierzchni APS4.	49
Rys. 31 Zestawienie zagłębienia penetratorów o regularnych kształtach w funkcji siły wymuszającej.....	50
Rys. 32 Zestawienie zagłębienia penetratorów z próbkami nawierzchni SMA8 i SMA11 w funkcji siły wymuszającej.	51
Rys. 33 Wpływ sztywności nawierzchni typu PERS na zagłębienie w oponę.	52
Rys. 34 Zestawienie zagłębienia w funkcji siły wymuszającej dla nawierzchni o różnym stopniu agresywności tekstury.	53
Rys. 35 Zagłębienie 2 różnych penetratorów w bieżnik opon o różnych twardościach mieszanki gumowej.....	54
Rys. 36 Przebieg zagłębienia penetratorów w oponę dla 2 różnych sił wymuszających.	55
Rys. 37 Zestawienie zagłębienia penetratorów w oponę w funkcji siły wymuszającej dla 6 wybranych nawierzchni.	56
Rys. 38 Korelacja współczynnika CEL metody pośredniej oceny oporu toczenia w funkcji wybranych parametrów: a) Wartości zagłębienia Z dla siły wymuszającej 117 N, b) Pola powierzchni Pp, c) Współczynnika kierunkowego trendu liniowego a, d) funkcji średniej głębokości profilu tekstury nawierzchni MPD.	58

Rys. 39 Stanowisko pomiarowe do badania tekstury nawierzchni.	59
Rys. 40 Program do sterowania skanerem tekstury nawierzchni: a) fragment schematu blokowego, b) interfejs graficzny.	60
Rys. 41 Schemat poruszania się czujnika laserowego.....	61
Rys. 42 Przykładowy fragment uzyskanej matrycy danych.	61
Rys. 43 Nawierzchnie o regularnej teksturze: a) wypukłe ostrosłupy, b) wklęsłe sfery.....	62
Rys. 44 Repliki rzeczywistych nawierzchni drogowych: a) APS4, b) SMA8.	62
Rys. 45 Stanowisko do wykonywania odcisków opony: badane koło, silikon do odlewania, badana replika umieszczona w ramce.....	63
Rys. 46 Utrwalanie odcisku opony na nawierzchni: a) opona ustawiona na nawierzchni i wypełniona silikonem odlewniczym, b) uwidocznione elementy nawierzchni, które miały bezpośredni kontakt z oponą.	63
Rys. 47 Odcisk opony na nawierzchni Wklęsła sfera_3: a) nawierzchnia Wklęsła sfera_3 z odkrytymi otworami odpowietrzającymi, b) spód nawierzchni Wklęsła soczewka_3 z rowkami odpowietrzającymi.....	64
Rys. 48 Replika nawierzchni SMA8 z otworami odpowietrzającymi.	64
Rys. 49 Odcisk gładkiej opony na nawierzchni wzorcowej (Wklęsły ostrosłup_3), a) fotografia odcisku opony, b) cyfrowy zapis powierzchni odcisku.	65
Rys. 50 Przekrój przez środek odcisku opony na nawierzchni Wklęsły ostrosłup_6: a) w kierunku wzdłużnym, b) w kierunku poprzecznym (w stosunku do prowadnic lasera).	65
Rys. 51 Efekt wypoziomowania zeskanowanego odcisku opony: a) w kierunku wzdłużnym, b) w kierunku poprzecznym.	66
Rys. 52 Przekrój skanu odcisku opony. Strzałką wskazano nieprawidłowo zmierzoną wartość.....	66
Rys. 53 Styk opony z nawierzchnią: a) rzeczywisty, b) odtworzony na podstawie zapisu cyfrowego.	67
Rys. 54 Utrwalony odlew odcisku opony podzielony na elementarne objętości.	68
Rys. 55 Przyrost objętości elementów tekstury penetrujących bieżnik opony w funkcji zagłębienia: a) wyznaczenie stycznej do krzywej, b) wyznaczenie maksymalnej głębokości w obliczeniach objętości, tj. górnej granicy całkowania.	68
Rys. 56 Zależność przyrostu objętości w funkcji zagłębienia $V = f(h)$ oraz charakterystyczne punkty.....	69
Rys. 57 Zestawienie L, H, K.....	70
Rys. 58 Maksymalne zagłębienie nierówności w oponę (L) oraz punkt przebicia osi Ox styczną (H) dla 14 próbek nawierzchni.....	70
Rys. 59 Korelacja pomiędzy metodą pośrednią wyznaczania oporu toczenia CEL a poszczególnymi parametrami: a) L (maksymalne zagłębienie nierówności w oponę), b) K (objętość elementów zanurzonych w oponę), c) SIOIZ (suma iloczynów objętości i zagłębienia), d) MPD (średnia głębokość profilu nawierzchni).	71
Rys. 60 Utrwalony odcisk opony na nawierzchni z wypukłymi ostrosłupami: a) widok na cały odcisk opony, b) zbliżenie na wystające elementy nawierzchni z odcisku opony, c) fragment nawierzchni ze zdjętym odciskiem opony.....	72
Rys. 61 Przekrój utrwalonego odcisku opony na nawierzchni z wypukłymi stożkami: a) przekrój w płaszczyźnie toczenia się opony, b) powiększony fragment przekroju ukazujący zjawisko dodatkowego otulania nierówności przez silikon odlewniczy	



powyżej powierzchni styku opony z nawierzchnią (niebieskie kółko), c) schemat demonstrujący zjawisko dodatkowego otulania nierówności nawierzchni poprzez silikon odlewniczy powyżej płaszczyzny odniesienia 1- opona, 2- płaszczyzna odniesienia- jest to płaszczyzna położona stycznie do najniższych punktów bieznika opony, 3- silikon odlewniczy, 4- nawierzchnia z agresywną teksturą, h- maksymalna głębokość wnikania nierówności nawierzchni w oponę, H- maksymalna wysokość nierówności tekstury, G- przestrzeń utworzona na skutek odkształcenia bieznika opony w wyniku oddziaływania nierówności nawierzchni. 74

- Rys. 62 Zależność pomiędzy objętością elementów tekstury a głębokością wnikania w oponę dla replik rzeczywistych nawierzchni SMA8 oraz APS4. Linie przerywane oznaczają przyrost objętości nierówności nawierzchni wraz z dodatkową objętością silikonu odlewniczego. Objętości te zostały wyznaczone dla utrwalonego odcisku opony na nawierzchni. Linie ciągłe oznaczają przyrost objętości nierówności nawierzchni. Objętości te zostały wyznaczone dla nawierzchni bez utrwalonego odcisku. 75
- Rys. 63 Zależność pomiędzy objętością elementów tekstury a głębokością wnikania w oponę dla pięciu nawierzchni. Liniami kropkowanymi oznaczono wybrane objętości elementów tekstury dla których wyznaczono wielkości zagłębień na poszczególnych nawierzchniach. 76
- Rys. 64 Zależności współczynnika oporu toczenia wyznaczone dla pięciu analizowanych nawierzchni w funkcji zagłębienia w odniesieniu do stałych objętości: a) opona SRTT. Zależność uzyskana dla stałej objętości 25 mm^3 , b) opona AAV4. Zależność uzyskana dla stałej objętości 150 mm^3 77
- Rys. 65 Zależność współczynnika korelacji liniowej R w funkcji stałych objętości. 77
- Rys. 66 Korelacja współczynnika oporu toczenia opon wzorcowych w funkcji zagłębienia dla stałej objętości wynoszącej 50 mm^3 : a) opona SRTT, b) opona AAV4. 78
- Rys. 67 Matryca do wykonania formy wzorcowej nawierzchni referencyjnej: a) cała matryca, b) powiększony fragment matrycy. 80
- Rys. 68 Forma do wykonania wzorcowej nawierzchni referencyjnej: a) cała forma, b) powiększony fragment formy. 81
- Rys. 69 Jedna z sekcji wzorcowej nawierzchni referencyjnej. 81
- Rys. 70 Nawierzchnia referencyjna po montażu na bębnie maszyny bieżnej. 82
- Rys. 71 Współczynniki oporu toczenia uzyskane dla dwóch opon SRTT i AAV4 na sześciu nawierzchniach łącznie z referencyjną. 83
- Rys. 72 Współczynniki oporu toczenia uzyskane dla sześciu na czterech nawierzchniach... 84
- Rys. 73 Korelacja współczynnika oporu toczenia opon wzorcowych w funkcji zagłębienia dla stałej objętości wynoszącej 50 mm^3 : a) opona SRTT, b) opona AAV4. Zestawiono 6 nawierzchni z Rys. 71. Czerwony punkt oznacza nawierzchnię referencyjną. 85
- Rys. 74 Korelacja współczynnika oporu toczenia opon wzorcowych w funkcji zagłębienia dla stałej objętości wynoszącej 50 mm^3 z wyjątkiem nawierzchni referencyjnej: a) opona SRTT, b) opona AAV4. Zestawiono 6 nawierzchni z Rys. 71. Zielony punkt oznacza nawierzchnię referencyjną. 85
- Rys. 75 Utrwalenie kształtu nawierzchni za pomocą silikonu odlewniczego: a) nawierzchnia rzeczywista SMA8, b) utrwalony kształt nawierzchni SMA8, c) nawierzchnia wzorcowa, d) utrwalony kształt nawierzchni wzorcowej. 99
- Rys. 76 Szkielet do wykonania formy: a) szkielet wewnętrzny i zewnętrzny formy, b) szkielet formy zewnętrznej przygotowany do wklejenia silikonu odlewniczego z utrwalonym

kształtem tekstury nawierzchni, c) szkielet formy wewnętrznej przygotowany do ukształtowania powierzchni walcowej.....	101
Rys. 77 Gotowe formy do wykonania segmentu nawierzchni: a) zewnętrzna z wklejonym silikonem odlewniczym z utwalonym kształtem tekstury nawierzchni wzorcowej, b) wewnętrzna z ukształtowaną powierzchnią walcową.....	101
Rys. 78 Forma zewnętrzna pokryta żelkotem.....	102
Rys. 79 Forma zewnętrzna pokryta matą szklaną.....	102
Rys. 80 Forma wewnętrzna pokryta folią.....	103
Rys. 81 Forma wewnętrzna pokryta matą szklaną i nasączona żywicą epoksydową.....	103
Rys. 82 Połączona i uszczelniona forma.....	104
Rys. 83 Forma wypełniona żywicą odlewniczą.....	104
Rys. 84 Segment nawierzchni wzorcowej.....	105
Rys. 85 Segment nawierzchni (replika APS4) poddany obróbce mechanicznej: a) segment nawierzchni z przymiarem do wykonania otworów montażowych , b) ostatni etap przygotowania segmentu nawierzchni do montażu.....	106
Rys. 86 Segmenty nawierzchni doświadczalnej zamontowane na bębnie maszyny bieżnej.....	107

20. LITERATURA:

1. Siłka W.: Teoria ruchu samochodu, Wydawnictwa Naukowo- Techniczne, 2002, str. 84- 97
2. Arczyński S.: Mechanika ruchu samochodu, Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, 1993, str. 45- 59
3. Ronowski G., Ejsmont J., Świczko- Żurek B.: Wpływ nawierzchni i opon na opór toczenia, Magazyn Autostrady, 2016, nr 10, str. 51- 55
4. Prochowski L., Unarski J., Wach W., Wicher J., Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2008, str. 44- 46
5. Lanzendoerfer J., Szczepanik C., Teoria ruchu samochodu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1980, str. 106- 114
6. Taryma S., Opór toczenia opon samochodowych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2007, str. 10-154
7. Taryma S., Mioduszewski P., Ronowski G., Woźniak R., Drywa M.: Wpływ nawierzchni drogowej na opór toczenia opon samochodowych, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 2012, nr 5, str. 451- 456
8. Taryma, S. Woźniak, R., Energetyczne aspekty toczenia koła ogumionego o dużej odkształcalności, Archiwum Motoryzacji, Wydawnictwo Naukowe Przemysłowego Instytutu Motoryzacji, 2010, nr 4, str. 301- 311
9. Taryma, S. Woźniak, R., Wpływ zużycia opony samochodowej na jej opór toczenia, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 2014, nr 6, str. 272- 275
10. Ejsmont, J., Świczko-Żurek, B., Ronowski, G., Opór toczenia opon samochodowych, Magazyn Autostrady, 2014, nr 7, str. 38- 42
11. International Standard ISO 28580: 2009: Passenger car, truck and bus tyres – Methods of measuring rolling resistance – Single point test and correlation of measurement results.
12. Świczko- Żurek B., Ejsmont J., Ronowski G.: Reduction of Tire Rolling Resistance by Optimization of Road Surfaces and Tires. COTUME'2014, Congrès Tunisien de Mécanique, Sousse, Tunezja 2014
13. Taryma S.: Analiza wpływu czynników eksploatacyjnych na opór toczenia opony. Czasopismo Techniczne Mechanika, Pojazdy Samochodowe, T. 2, Z. 7M/2004. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2004, str. 621- 628
14. Lou Y.C.: Relationship of Tire Rolling Resistance to the Viscoelastic Properties of the Tread Rubber. Tire Science and Technology: August 1978, Vol. 6, No. 3, str. 176-188
15. Clark K. S., Mechanics of Pneumatic Tires, Washington, USA, 1978
16. Gronowicz J., Ochrona środowiska w transporcie lądowym, WiZPITE, 2003, str. 372
17. Reimpell J., Betzler J., Podwozia samochodów. Podstawy konstrukcji, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2001, str. 456
18. Siłka W., Energochłonność ruchu samochodu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1997, str. 144
19. Chłopek Z., Ochrona środowiska naturalnego, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2002, str. 174



20. Jackowski J., Luty W., Wieczorek M., Oszacowanie oporu toczenia ogumienia 12R22,5, Warszawa., WAT 2002, str. 19
21. Lewandowski J., Zagadnienia badania i oceny oporu toczenia opon samochodowych. Technika Motoryzacyjna, 4/1970, str. 105- 111
22. Strona internetowa:
webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:hvX7_I5FfkJ:https://repo.pw.edu.pl/docstore/download/WUT92be79ff1ba3466b9e84e09f30d16dd8/Art%2Bpreprint.pdf+&cd=1&hl=pl&ct=clnk&gl=pl, 01.05.2017r.
23. Hall D. E., Moreland J. C.: Fundamentals of Rolling Resistance. Rubber Chemistry and Technology: July 2001, Vol. 74, No. 3, str. 525- 539
24. Pillai P. S., Fielding- Russell G. S.: Effect of Aspect Ratio on Tire Rolling Resistance. Rubber Chemistry and Technology: September 1991, Vol. 64, No. 4, str. 641- 647
25. Pillai P. S.: Total Tire Energy Loss Comparison by the Whole Tire Hysteresis and the Rolling Resistance Methods. Tire Science and Technology, Volume 23, Issue 4, str. 256-265 (October 1995)
26. Fielding-Russell G. S., Pillai P. S.: Tire rolling resistance from whole- tirehysteresis ratio. Rubber chemistry and technology, V65 n 2 May-Jun 1992, str. 444-452
27. Sandberg U. (editor) "Rolling Resistance - Basic Information and State-of-the-Art on Measurement Methods, Deliverable #1, MIRIAM SP1, 2011
28. Ejsmont J. A.: Hałas opon samochodowych- wybrane zagadnienia. Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej 1992, nr 498, Mechanika 68, str. 178
29. Swedish National Road and Transport Research Institute. Research for mobility, Linköping, Sweden, prospect VTI
30. Jurkowski B., Lewandowski J.: Opór toczenia opon samochodowych, Technika Motoryzacyjna, 6/1980, str. 18- 20
31. Mazurek J.: Badania opon na maszynie bieżnej Firmy Hasbach w TC Dębica, Auto Technika Motoryzacyjna 4/1992, str. 10- 13
32. Mazurek J.: System badań i oceny ogumienia w Firmie Oponiarskiej Dębica S.A., Auto Technika Motoryzacyjna, Motoryzacyjny Kwartalnik Naukowo- Techniczny. l' 94, str. 8- 11
33. Nałęcz A.: Równowaga dynamiczna pojazdu samochodowego przy skośnym opływie powietrza. Prace IPPT, 2/1976, str. 65
34. Norma SAE J1269 MAR 87, str. 14
35. Norma ISO 18164 Passenger car, truck, bus and motorcycle tyres- Methods of measuring rolling resistance, 2005, str. 22
36. Ejsmont J. A., Taryma S., Wilga M., Woźniak R.: Pomiary oporów toczenia opon samochodowych. W: (Materiały) IV Konferencja Naukowo- Techniczna „Pojazdy samochodowe. Problemy rozwoju i eksploatacji”, AUTOPROGRES' 93, Jachranka k. Warszawy, 1993, str 284- 296
37. Ejsmont J. A.: Maszyna bieżna do badań oporu toczenia opon samochodowych, Politechnika Gdańska, Wydział Budowy Maszyn, Katedra Pojazdów i Maszyn Roboczych, 1989, str. 26

38. Woźniak R., Taryma S., Ejsmont J. A., Wilga M.: Laboratoryjne metody pomiaru oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchni szorstkiej i gładkiej. Auto- Technika Motoryzacyjna. Motoryzacyjny Kwartalnik Naukowo- Techniczny, I- 94, str. 16- 18
39. Woźniak R., Taryma S., Ejsmont J. A., Wilga M.: Metody pomiaru oporu toczenia opon samochodowych. W: (Materiały) Sympozjum „Metody badań i kontroli opon samochodowych”, Straszęcín k. Dębicy, 1993, str. 10
40. Woźniak R., Ejsmont J. A., Taryma S., Wilga M.: Wpływ ciśnienia panującego wewnątrz opony na opór toczenia. Auto Technika Motoryzacyjna. Motoryzacyjny Kwartalnik Naukowo- Techniczny, I- 94, str. 15- 16
41. Bang J. R.: Influence of The Rolling Resistance on Fuel Consumption, Bang Consult, Norway, 1999, str. 8
42. Falkiewicz B. S.: Diwakow N. W.: Metody ispytaniya awtomobila i jego mechanizmow. Moskwa: MASZGIZ 1955, str. 160
43. Falkiewicz B. S.: Diwakow N. W.: Ispytaniya awtomobila. Moskwa: MASZGIZ 1952, str. 240
44. Norma ISO 13473-2: 2002(en): Characterization of pavement texture by use of surface profiles — Part 2: Terminology and basic requirements related to pavement texture profile analysis
45. Mioduszewski P.: Badanie tekstury nawierzchni drogowej, Konferencja KonMot, 2002
46. Sandberg U.: Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy and Safety. VTI Notat 53A- 1997, Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Sweden, 1997, str. 93
47. ISO 10844 "Acoustics - Test surface for road vehicle noise measurement", International Organisation for Standardization, Geneva, 1994
48. Norma PN-EN ISO 13473-1:2005 - Charakterystyka struktury nawierzchni przy użyciu profili powierzchniowych - Część 1: Określenie średniego profilu głębokości (Characterization of Pavement Texture Utilizing Surface Profiles, Determination of Mean Profile Depth)
49. Torbruegge S., Wies B.: Characterization of pavement texture by means of height difference correlation and relation to wet skid resistance, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2015, str. 59- 67
50. <http://www.lrrb.org/pdf/201429.pdf>, Rolling Resistance Measurements at the MnROAD Facility, Round 2, James Wilde, Principal Investigator Center for Transportation Research and Implementation Minnesota State University, Mankato, Research Project Final Report 2014-29
51. Sandberg U.: Rolling resistance measurements on laboratory drum versus measurements on road surfaces, Presentation at: Energy Efficient Tyres Workshop in Paris 15-16 November 2005
52. Strona internetowa: <https://www.gddkia.gov.pl/pl/d/dc7cc67c8c11676a65d55642e22c28b7>, 05.06.2017r.
53. Strona internetowa: https://www.google.pl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiWubT16eLVAhUCEpoKHdBrBicQFggnMAA&url=http%3A%2F%2Farchiwummotoryzacji.pl%2Fimages%2FAM%2Fvol70%2Fvol70-121-132-EJSMONT_pl.pdf&usq=AFQjCNELv_Sdd6i4q-MYfKnxprE3u4mjfg, 05.06.2017r.

54. Sandberg U., Bergiers A, Ejsmont J. A., Goubert L., Karlsson R., Zöller M.: Road surface influence on tyre/road rolling resistance. Report MIRIAM_SP1_04, Project MIRIAM, 2011, available at: http://www.miriam-co2.net/Publications/MIRIAM_SP1_Road-Surf-Infl_Report%20111231.pdf
55. Ejsmont J., Ronowski G., Wilde W.J.: Rolling Resistance Measurements at the MnROAD Facility, Interim Report 2012-07, Minnesota Department of Transportation Research Services Section, 395 John Ireland Blvd., MS 330, St. Paul, MN 55155, USA, available at: <http://www.dot.state.mn.us/research/TS/2012/2012-07.pdf>
56. Ejsmont J., Ronowski G., Taryma S., Mioduszeowski P., Sobieszczyk S., Świczko- Żurek B.: Relations between tire/road noise and tire rolling resistance on different road pavements, New York City, USA, Inter Noise, August 19-22, 2012
57. Strona internetowa:
59. Strona internetowa:
61. Strona internetowa: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BAT1-0044_0006/c/nr_3_67-73.pdf, 08.06.2017r.
62. Sayers M. W., Karamihis S. M.: The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles, 1996

63. Strona internetowa: [http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2016.1160835](https://www.google.pl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwieqNrFnuPVAhXnlpoKHUocD7EQFggsMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.leo.mech.pg.gda.pl%2Fsites%2Fleo.mech.pg.gda.pl%2Ffiles%2FPaper%2520Reduction%2520of%2520Tire%2520Rolling%2520Resistance%2520by%2520Optimization%2520of%2520Road%2520Surfaces%2520and%2520Tires%2520-%2520COTUME2014%2520.pdf&usg=AFQjCNEqwTpUtmPH5w_QjaRC6A-hf80OXw,09.06.2017r.</p>
<p>64. Ejsmont J.A., Ronowski G., Świeczko- Żurek B., Sommer S.: Road Texture Influence on Tyre Rolling Resistance.-., <a href=)
65. Farroni F., Timpone F.: Member, IAENG, A Test Rig for Tyre Envelope Characterization, Engineering Letters, 24:3, EL_24_3_08, Advance online publication: 27 August 2016
66. Pauwelussen J. P., Dalhuijsen W., Merts M.: Tyre dynamics, tyre as a vehicle component Part 1.: Tyre handling performance, Virtual Education in Rubber Technology (VERT), FI-04-B-F-PP-160531, HAN University, October 16, 2007
67. Strona internetowa: <http://www.newsweek.pl/styl-zycia/liczba-samochodow-w-polsce-europie-i-na-swiecie-statystyki-,artykuly,394554,1.html>, 13.06.2017r.
68. Ronowski G.: Układ kompensacji wpływu wzniesienia oraz przyspieszenia w przyczepie do badania oporu toczenia, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 2017, nr 7-8, str. 395- 397
69. Gough V. E.: Tyres and air suspension, Advances in Automobile Engineering, editor G.H. Tidbury, Pergamon Press, Oxford, U.K., 1963
70. Dahunsi O. A., Pedro J. O.: Neural network-based identification and approximate predictive control of a servo-hydraulic vehicle suspension system, Engineering Letters, vol. 18, no. 4, pp357-368, 2010
71. Wallaschek J., Wies B.: Tyre tread-block friction: modelling, simulation and experimental validation, Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Volume 51, Issue 7, pp. 1017-1026, 2013
72. Lippmann S. A., Nanny J. D.: A Quantitative Analysis of the Enveloping Forces of Passenger Tires, SAE paper 670174, 1967
73. Strona internetowa: <http://hitech.studentnews.pl/s/3911/76450-Nowe-technologie/4053377-Dramatyczne-ograniczenie-halasu-ruchu-drogowego-dzieki-nawierzchniom-ze-zutylizowanych-opon.htm>, 11.09.2017r.
74. Strona internetowa: http://cordis.europa.eu/result/rcn/158466_pl.html, 11.09.2017r.
75. Ejsmont J., Ronowski G., Taryma S., Świeczko- Żurek B.: The influence of road surface unevenness on tyre rolling resistance, Archiwum Motoryzacji, Wydawnictwo Naukowe Przemysłowego Instytutu Motoryzacji, 2015, nr 4, str. 35- 46, 121- 132
76. Ronowski G.: Design and Calibration of Rolling Resistance Test Trailer R2Mk.2, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016

77. Ejsmont J., Motrycz G., Ronowski G., Stryjek P., Sobieszczyk S.: Laboratoryjne badania oporu toczenia i temperatury opon do pojazdów specjalnych// Badania eksperymentalne i symulacyjne dynamiki pojazdu wieloosiowego w warunkach uszkodzenia ogumienia : praca zbiorowa/ ed. Politechnika Krakowska Kraków: , 2012, str.1- 10
78. Ejsmont J., Ronowski G., Świeczko- Żurek B.: Accurate rolling resistance Rolling resistance measurements can be influenced by a number of factors, Tire Technology International, 2017, nr. 164, str.14- 18
79. Ejsmont J., Świeczko- Żurek B., Ronowski G.: MnRoad facility, Badania nawierzchni drogowych w amerykańskim stylu, Magazyn Autostrady, Budownictwo Drogowo-Mostowe, nr 10, 2014, str. 66- 71
80. Ronowski G.: Przyczepa do pomiaru oporu toczenia opon i nawierzchni drogowych - wybrane zagadnienia, Magazyn Autostrady, 2017, nr. 5, str.160-163
81. Owczarzak W.: Oscylacyjna metoda oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności, Rozprawa Doktorska
82. Ejsmont J., Sommer S.: Selected aspects of pavement texture influence on tire rolling resistance, Coatings, 2021
83. Clapp T. G., Eberhardt A. C., Kelley C. T.: Development and Validation of a Method for Approximating Road Surface Texture-Induced Contact Pressure in Tire-Pavement Interaction, Tire Science and Technology, 16 (1), str. 2- 17
84. Fong S., Tyre noise predictions from computed road surface texture induced contact pressure, INTER- NOISE 1998, Christchurch, New Zealand
85. Klein P., Hamet J. F., Road texture and rolling noise: an envelopment procedure for tire- road contact. Rapprot de recherche
86. Gottaut C., Goubert L., Texture- based descriptors for road surface properties and how they can be used in the appropriate standards, resreport, Austrian Institute of Technology, ROSANNE Deliverable D 4.2

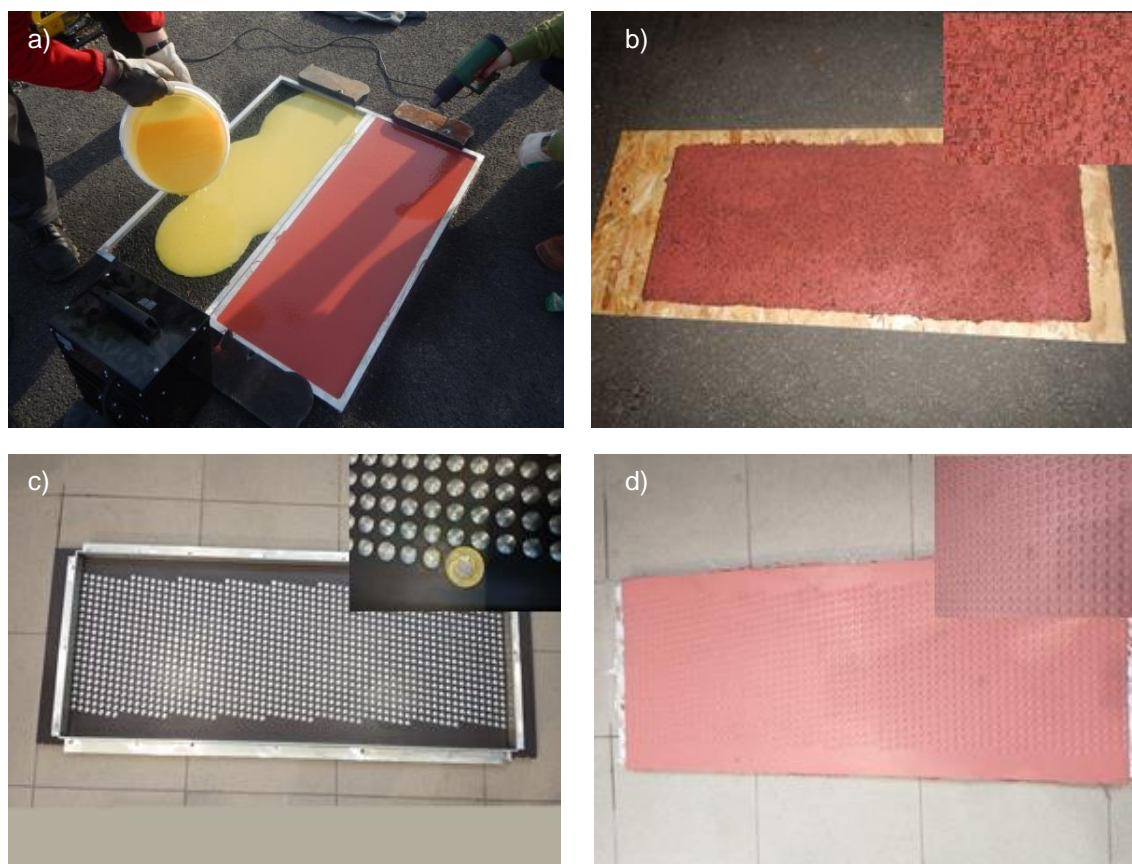
ZAŁĄCZNIK 1.

TECHNOLOGIA WYTWARZANIA NAWIERZCHNI DO POKRYWANIA BĘBNÓW STALOWYCH

Opracowana technologia umożliwia wytwarzanie nawierzchni, którymi można pokrywać stalowe bębny z bieżnią zewnętrzną jak i wewnętrzną. Zaletą tej metody jest to, że średnica pokrywanych bębnow może być praktycznie dowolna. Każda wytworzona nawierzchnia składa się z segmentów, których liczba jest uzależniona od rozmiarów bębna maszyny bieżnej. Materiałem konstrukcyjnym jest żywica epoksydowa zbrojona włóknami szklanymi. W dalszej części pracy przedstawiono poszczególne etapy technologii wytwarzania nawierzchni. Autor niniejszej rozprawy jest twórcą szeregu modyfikacji, które w znaczący sposób poprawiły jakość wytwarzanych nawierzchni.

Wykonanie odlewu rzeczywistej lub wzorcowej nawierzchni

W pierwszym etapie należy odwzorować teksturę nawierzchni. W tym celu wykonuje się odlew przy pomocy silikonu odlewniczego. Powierzchnia odlewu jest ograniczona ramką, która musi szczelnie przylegać do nawierzchni. Ten etap zarówno dla nawierzchni rzeczywistej jak i wzorcowej został przedstawiony na Rys. 75.



Rys. 75 Utrwalenie kształtu nawierzchni za pomocą silikonu odlewniczego: a) nawierzchnia rzeczywista SMA8, b) utrwalony kształt nawierzchni SMA8, c) nawierzchnia wzorcowa, d) utrwalony kształt nawierzchni wzorcowej.

Przygotowanie szkieletu formy zewnętrznej i wewnętrznej do odlewania segmentu nawierzchni

Kolejny etap polega na wytworzeniu szkieletu formy. Jego wymiary geometryczne są uzależnione od rozmiarów bębna maszyny bieżnej. Szkielet składa się z dwóch części: zewnętrznej, jak i wewnętrznej (Rys. 76). Forma zewnętrzna (z wklęsłym łukiem) służy do osadzenia silikonowego odlewu tekstury nawierzchni (negatyw tekstury nawierzchni). Forma wewnętrzna (z wypukłym łukiem) służy do odwzorowania krzywizny bębna. Z uwagi na duży skurcz żywicy epoksydowej należy odpowiednio skorygować promień krzywizny formy wewnętrznej i zewnętrznej. Ta korekta ustalana jest doświadczalnie.



Rys. 76 Szkielet do wykonania formy: a) szkielet wewnętrzny i zewnętrzny formy, b) szkielet formy zewnętrznej przygotowany do wklejenia silikonu odlewniczego z utrwalonym kształtem tekstury nawierzchni, c) szkielet formy wewnętrznej przygotowany do ukształtowania powierzchni walcowej.

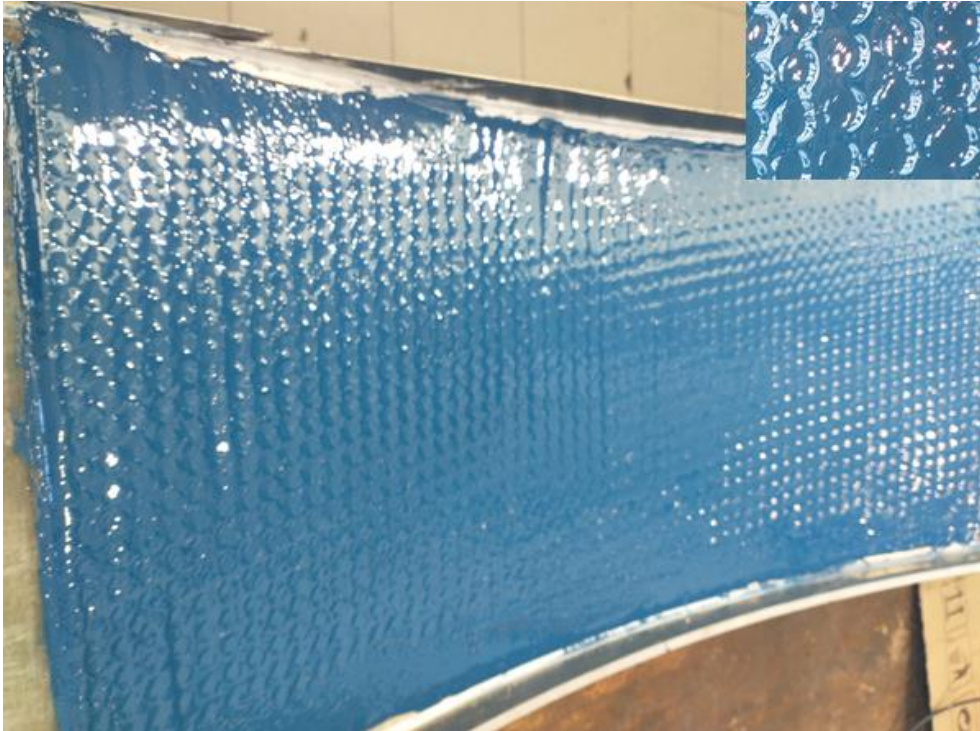
W efekcie tego etapu uzyskuje się gotową formę zewnętrzną z wbudowanym negatywem tekstury nawierzchni oraz formę wewnętrzną z ukształtowaną powierzchnią walcową. Obydwie części formy przedstawiono na Rys. 77.



Rys. 77 Gotowe formy do wykonania segmentu nawierzchni: a) zewnętrzna z wklejonym silikonem odlewniczym z utrwalonym kształtem tekstury nawierzchni wzorcowej, b) wewnętrzna z ukształtowaną powierzchnią walcową.

Pokrycie formy zewnętrznej żelkotem wymieszanym z kruszywem

W celu zwiększenia twardości tekstury wytwarzanej nawierzchni należy pokryć żelkotem powierzchnię wewnętrzną formy zewnętrznej (Rys. 78). Możliwa jest zmiana własności żelkotu poprzez dodawanie różnego rodzaju wypełniaczy w odpowiedniej proporcji. Dzięki temu można wpływać na twardość powierzchni tekstury jak i jej przyczepność do opony.



Rys. 78 Forma zewnętrzna pokryta żelkotem.

Nałożenie maty szklanej i nasączenie jej żywicą epoksydową

Kolejnym ważnym etapem jest zwiększenie szczepności żelkotu z żywicą odlewniczą. W tym celu nanoszone są na żelkot cięte, szklane włókna (Rys. 79).



Rys. 79 Forma zewnętrzna pokryta matą szklaną.

Pokrycie folią wewnętrzną formy

Następnym krokiem jest właściwe przygotowanie powierzchni formy wewnętrznej. Ma to na celu ułatwienie rozdzielania segmentu nawierzchni od formy. Pokrywanie powierzchni formy środkami antyadhezyjnymi na bazie silikonu nie przynosiło oczekiwanych efektów. Dopiero pokrywanie powierzchni formy cienką folią umożliwiło właściwe rozdzielanie form od odlewu (Rys. 80). Przy rozformowywaniu segmentu nawierzchni powierzchnia formy zewnętrznej jest narażona na uszkodzenia. Po takim zabiegu należy każdorazowo sprawdzić jej geometrię. W tym celu wprowadzono warstwę kontrolną pigmentu, który ułatwia taką weryfikację.



Rys. 80 Forma wewnętrzna pokryta folią.

Nałożenie maty szklanej i nasączenie żywicą

W kolejnym etapie należy nanieść warstwy maty szklanej nasączone żywicą epoksydową na wewnętrzną formę. Ma to na celu wzmocnienie segmentu nawierzchni, który jest obciążany siłami odśrodkowymi oraz naciskami pochodzącymi od współpracującej z nią opony (Rys. 81).



Rys. 81 Forma wewnętrzna pokryta matą szklaną i nasączona żywicą epoksydową.

Połączenie formy wewnętrznej i zewnętrznej po uprzednim uszczelnieniu

W tym etapie forma zewnętrzna łączona jest z formą wewnętrzną. Połączenie jest uszczelnianie za pomocą kleju silikonowego (Rys. 82).



Rys. 82 Połączona i uszczelniona forma.

Wypełnienie formy żywicą odlewniczą

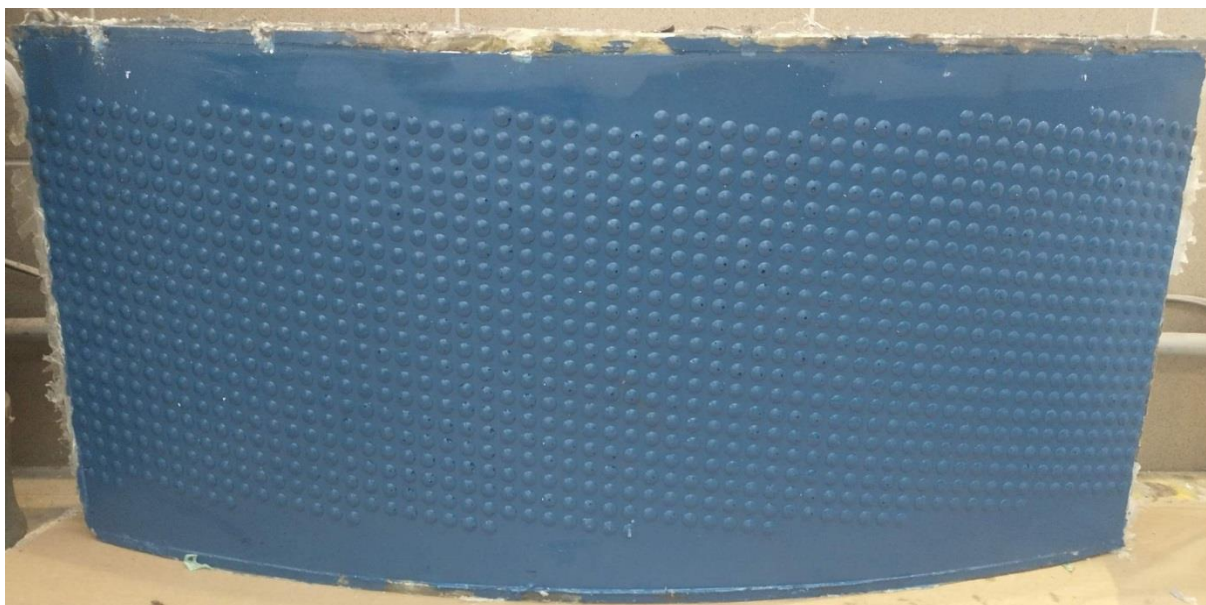
W kolejnym kroku należy wypełnić złożoną formę żywicą odlewniczą. Wprowadzanie specjalnego dodatku wzmacniającego żywicę odlewniczą jest uzależnione od maksymalnych prędkości badawczych (Rys. 83). Odlew należy pozbawić pęcherzyków powietrza przy pomocy metody wibracyjnej lub podciśnieniowej.



Rys. 83 Forma wypełniona żywicą odlewniczą.

Rozformowanie segmentu repliki po utwardzeniu żywicy

W zależności od rodzaju zastosowanej żywicy należy odczekać 24 lub 48 godzin do pełnego utwardzenia segmentu nawierzchni. Następnie należy rozformować odlew zachowując dużą ostrożność, ponieważ na tym etapie łatwo jest uszkodzić teksturę segmentu jak i powierzchnię formy. Na Rys. 84 przedstawiono prawidłowo rozformowany segment nawierzchni wzorcowej.



Rys. 84 Segment nawierzchni wzorcowej.

Obróbka mechaniczna segmentów

Otrzymane segmenty należy poddać obróbce mechanicznej. W pierwszym kroku należy przyciąć nawierzchnie do właściwych wymiarów. W kolejnym kroku należy wykonać otwory montażowe przy użyciu szablonu (Rys. 85a). W przypadku nawierzchni o agresywnej teksturze w rejonie otworów montażowych należy przeszlifować powierzchnię (Rys. 85b). Ma to na celu umożliwienie prawidłowego montażu sekcji na bębnie.



Rys. 85 Segment nawierzchni (replika APS4) poddany obróbce mechanicznej: a) segment nawierzchni z przymiarem do wykonania otworów montażowych , b) ostatni etap przygotowania segmentu nawierzchni do montażu.

Montaż na bębnie


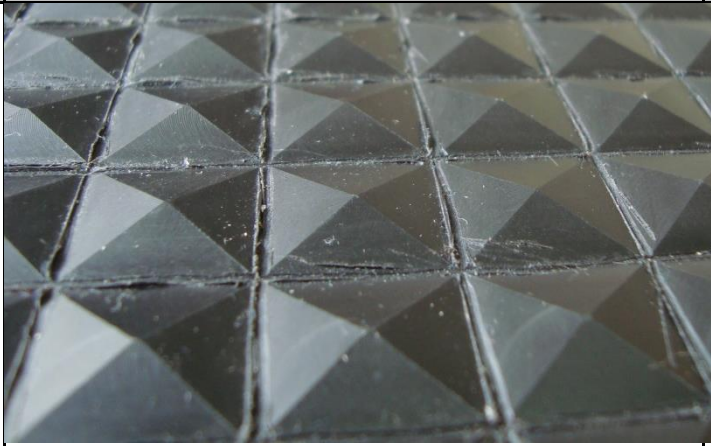
Po odpowiednim przygotowaniu segmentów nawierzchni można przystąpić do ich montażu na bębnie maszyny bieżnej. Podczas dokręcania śrub należy zwrócić uwagę na to czy nie pojawiają się pęknięcia segmentów. Takie zjawisko świadczy o źle dobranej geometrii formy odlewniczej. W przypadku pojawienia się jakichkolwiek pęknięć segment należy wymienić na nowy. Na Rys. 86 przedstawiono zamontowaną na bębnie nawierzchnię doświadczalną z jednokierunkową teksturą.


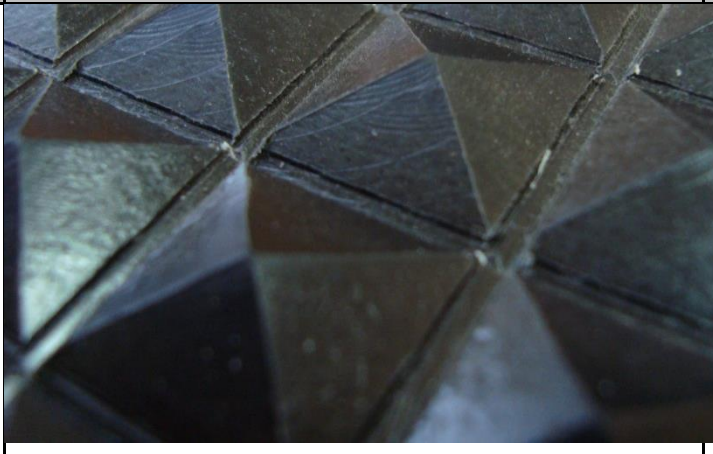



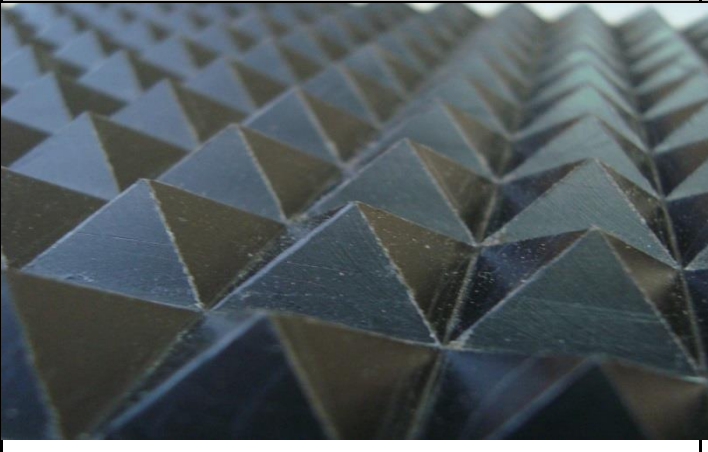
Rys. 86 Segmenty nawierzchni doświadczalnej zamontowane na bębnie maszyny bieżnej.

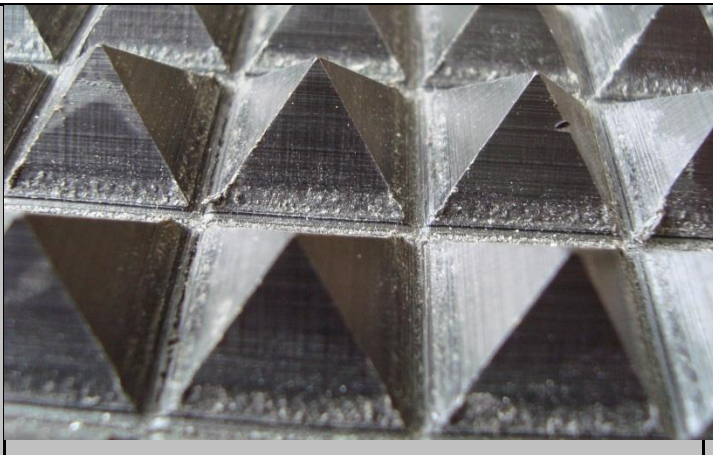

ZAŁĄCZNIK 2.

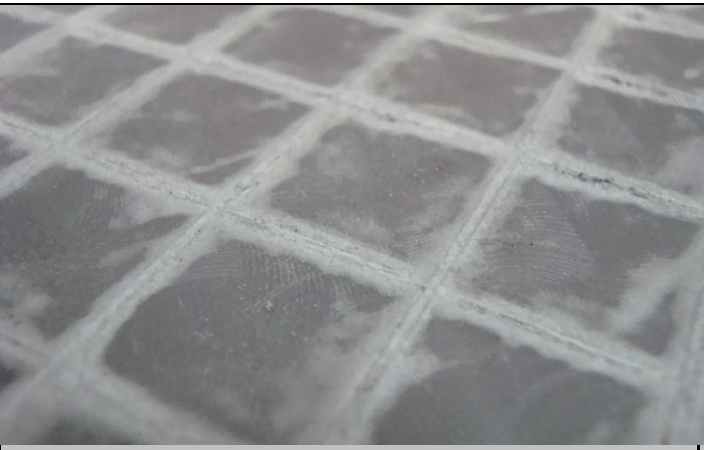

CHARAKTERYSTYKA NAWIERZCHNI UŻYWANYCH DO BADAŃ


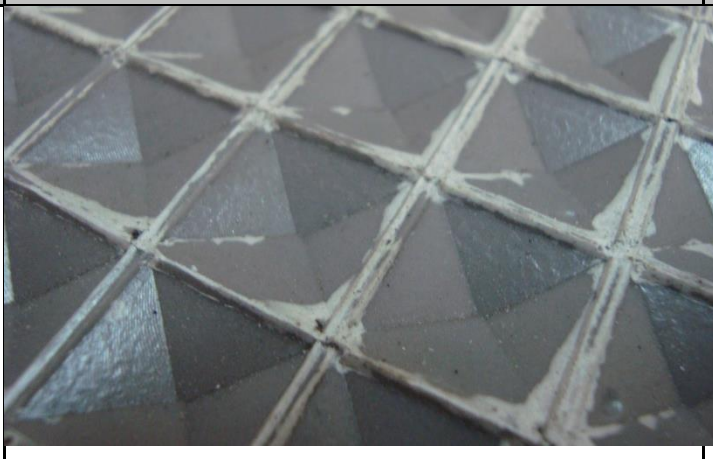
Oznaczenie	Zdjęcie nawierzchni	Opis	MPD (mm)
Wypukły ostrosłup_1		Nawierzchnia o kształcie powtarzających się ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 1 mm	0,50
Wypukły ostrosłup_2		Nawierzchnia o kształcie powtarzających się ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 2 mm	1,00


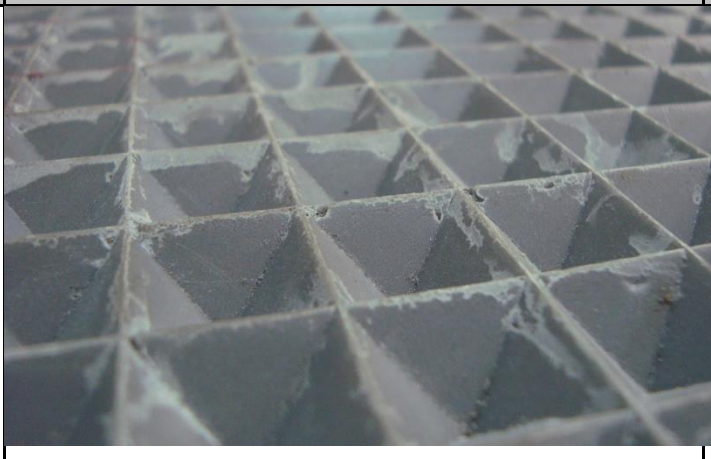
<p>Wypukły ostrosłup_3</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 3 mm</p>	<p>1,50</p>
<p>Wypukły ostrosłup_4</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 4 mm</p>	<p>2,00</p>



<p>Wypukły ostrosłup_6</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 6 mm</p>	<p>3,00</p>
<p>Wypukły ostrosłup_8</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 8 mm</p>	<p>4,00</p>

<p>Wypukły ostrosłup_9</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 9 mm</p>	<p>4,50</p>
<p>Wypukła sfera_3</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzającej się sfery o średnicy 12 mm i wysokości 3 mm. Środki sfer oddalone o 17 mm</p>	<p>1,50</p>


<p>Wklęsły ostrosłup_1</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się odwróconych ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 1 mm</p>	<p>0,50</p>
<p>Wklęsły ostrosłup_2</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się odwróconych ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 2 mm</p>	<p>1,00</p>

<p>Wklęsły ostrosłup_3</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się odwróconych ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 3 mm</p>	<p>1,50</p>
<p>Wklęsły ostrosłup_4</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się odwróconych ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 4 mm</p>	<p>2,00</p>

<p>Wklęsły ostrosłup_6</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się odwróconych ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 6 mm</p>	<p>3,00</p>
<p>Wklęsły ostrosłup_8</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się odwróconych ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 8 mm</p>	<p>4,00</p>

<p>Wklęsły ostrosłup_9</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzających się odwróconych ostrosłupów o podstawie 16 x 16 mm i wysokości 9 mm</p>	<p>4,50</p>
<p>Wklęsła sfera_3</p>		<p>Nawierzchnia o kształcie powtarzającej się odwróconej sfery o średnicy 12 mm i wysokości 3 mm. Środki sfer oddalone o 17 mm</p>	<p>1,50</p>

<p>PERS_replika</p>		<p>Replika nawierzchni poroelastycznej z kruszywem 4 mm wykonana z żywicy epoksydowej</p>	<p>1,53</p>
<p>APS4_replika</p>		<p>Replika imitująca powierzchniowe utrwalenie 8/10 wykonana z żywicy epoksydowej</p>	<p>4,75</p>

<p>SMA8_replika</p>		<p>Replika SMA8 wykonana z żywicy epoksydowej</p>	<p>1,31</p>
----------------------------	--	---	-------------

ZAŁĄCZNIK 3.

DOROBEK NAUKOWY

Publikacje

1. Ejsmont J., **Sommer S.**: Selected aspects of pavement texture influence on tire rolling resistance/ Coatings, **2021**, MNSiW= 100 pkt
2. Sommer A., Dederko-Kantowicz P., Staroszczyk H., **Sommer S.**, Michalec M.: Enzymatic and Chemical Cross-Linking of Bacterial Cellulose/Fish Collagen Composites—A Comparative Study// International Journal of Molecular Sciences -Vol. 22, 7 (**2021**), MNSiW= 140 pkt
3. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B., Owczarzak W., **Sommer S.**, Ronowski G.: Tire/Road Noise On Poroelastic Road Surfaces - Results Of Laboratory Measurements// Euronoise 2018 - Conference Proceedings/ ed. Michael Taroudakis Hersonissos, Crete, Greece: Copyright © 2018 | EAA – HELINA |, **2018**, s. 2719-2723
4. Ejsmont J., Świeczko-Żurek B., Owczarzak W., **Sommer S.**, Mioduszewski P.: Degradation of reference tyres used for CPX measurements// The 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Proseedings of INTER-NOISE 2017/ Hong Kong: Hong Kong Institute of Acoustics, **2017**, s.4685-4691
5. Ejsmont J.A., Ronowski G., Świeczko- Żurek B., **Sommer S.**, Owczarzak W., Sposób i urządzenie do laboratoryjnej oceny oporu toczenia opon samochodowych na nawierzchniach drogowych o różnej teksturze i sztywności, **2016**- patent
6. Ejsmont J.A., Ronowski G., Świeczko- Żurek B., **Sommer S.**, Road Surface Influence on Tyre Rolling Resistance **2016**, MNSiW= 30 pkt
7. Ronowski G., Ejsmont J., **Sommer S.**, Owczarzak W.: CP2015 – zmodyfikowana metodyka przewidywania hałasu powstającego na parkingach, stacjach paliw, MOP-ach i punktach poboru opłat// Magazyn Autostrady. nr. 7 (**2015**), s.18-21, MNSiW= 5 pkt
8. **Sommer S.**: Nowoczesne systemy bezpieczeństwa w pojazdach samochodowych// Logistyka. - ., nr. 3 (**2015**), s.4552-4556
9. Owczarzak W., **Sommer S.**: Opis śladów służących do rekonstrukcji wypadku drogowego z udziałem pieszych// TTS Technika Transportu Szynowego. -. , nr. 12 (**2015**), MNSiW= 5 pkt
10. Owczarzak W., **Sommer S.**, Mioduszewski P., Woźniak R.: Hałas emitowany przez samochody z napędem hybrydowym i elektrycznym. PREPRINT// TTS Technika Transportu Szynowego. -. , nr. 12 (**2015**), MNSiW= 5 pkt
11. **Sommer S.**: Sposoby przygotowania warstwy wierzchniej w połączeniach adhezyjnych. PREPRINT// TTS Technika Transportu Szynowego. -. , nr. 12 (**2015**), MNSiW= 5 pkt
12. Owczarzak W., **Sommer S.**, Mioduszewski P.: Noise emitted by SKM Trains in Gdansk// Logistyka. -. , nr. 04 (**2014**), s.4771-4776, MNSiW= 10 pkt
13. Owczarzak W., **Sommer S.**: Hałas komunikacyjny autostrady A1 na odcinku Rusocin-Swarożyn// Logistyka. -. , nr. 06/2014 (**2014**), MNSiW= 10 pkt
14. Owczarzak W., **Sommer S.**: Problem hałasu drogowego na przykładzie Gdyni// Logistyka. -. , nr. 06/2014 (**2014**), MNSiW= 10 pkt

15. Owczarzak W., **Sommer S.**, Taryma S.: Gdańska komunikacja miejska - rozwój i prognozy// Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. -, nr. 7-8 (2014), s.34-42, MNSiW= 4 pkt
16. Fydrych D., **Sommer S.**, Rogalski G.: Wspomaganie decyzji zakupu urządzeń do spawania metodą MIG/MAG z wykorzystaniem analizy skupień// Przegląd Spawalnictwa. -, nr. 12 (2014), MNSiW= 6 pkt
17. Owczarzak W., **Sommer S.**: Nadchodzące zmiany prawne dotyczące czterokołowców// Rzeczoznawca Samochodowy. -, nr. 187 (2014), s.20-22
18. Fydrych D., **Sommer S.**, Rogalski G.: Analiza skupień jako metoda wspomaganie decyzji zakupu urządzeń prądu stałego do spawania metodą TIG // Logistyka. -, nr. 6 (2014), s.1-7, MNSiW= 10 pkt
19. **Sommer S.**: Przegląd programów 2D oraz 3D do fotogrametrii na przykładzie PC- Rect oraz PhotoModeler// Logistyka. -, nr. 6 (2014), s.1-5, MNSiW= 10 pkt

Udział w projektach

1. ELANORE | Ulepszenie systemu etykietowania opon UE w zakresie hałasu i oporów toczenia.
2. SEPOR | „Bezpieczna, proekologiczna poroelastyczna nawierzchnia drogowa”. Opracowanie innowacyjnej poroelastycznej nawierzchni drogowej charakteryzującej się bardzo niską hałaśliwością, wodoprzepuszczalnością, tłumieniem pożarów rozlewisk paliw płynnych i dobrymi własnościami w zakresie oporu toczenia oraz właściwości przeciwoślizgowych. Umowa nr TECHMATSTRATEG1/347040/17/NCBR/2018.
3. BLOW | Opracowanie metod neutralizacji zagrożenia wybuchu wytypowanych zbiorników z gazami technicznymi, w tym alternatywnymi źródłami zasilania w środowisku pożarowym na potrzeby ratowników biorących udział w akcjach ratowniczo-gaśniczych. Nr projektu: DOB-BIO6/02/50/2014, źródło finansowania NCBiR W-wa.
4. LEO | Niskoemisyjne opony i nawierzchnie drogowe zoptymalizowane dla samochodów elektrycznych i hybrydowych. Nr projektu: Pol-Nor/196196/1/2013, źródło finansowania: NCBiR W-wa.
5. ROSANNE | Metody badawcze oporu toczenia, przyczepności i hałasu opon na nawierzchniach drogowych.